

Fédération Française d'Études et de Sports Sous-Marins
Fondée en 1948, membre fondateur de la Confédération mondiale des activités subaquatiques
French Underwater Federation

COMMISSION TECHNIQUE REGIONALE

Avantages et difficultés liées à l'adoption des recycleurs fermés électroniques en plongée loisir

Novembre 2011



Eric MARTIN

MF2 n°1414

Formateur de Moniteurs Inspiration Vision Trimix n°12

Remerciements

Je tiens à remercier tous particulièrement ceux sans qui je n'aurais jamais pu avoir le parcours subaquatique riche et merveilleux que j'ai eu et qui me permettent à présent d'en imaginer un plus bel encore…

Un grand merci tout d'abord à mes parents qui dès l'âge de 13 ans m'ont permis d'être initié aux joies de la plongée sous-marine à Banyuls-sur-mer. Je ne peux ensuite qu'être redevable à tous les moniteurs de notre fédération qui m'ont transmis leur passion et leurs connaissances en toute simplicité. Ils m'ont donné à jamais le goût de faire de même et c'est pour moi une joie et un honneur renouvelés de les avoir pour pairs depuis plus de 20 ans.

Je tiens tout particulièrement à remercier mes parrains, Gérard Maricelle et Philippe Voisembert pour leurs conseils précieux et leur amitié depuis la préparation de mon MF2.

Une étape plus récente mais au combien passionnante de ma vie de plongeur est la découverte des recycleurs fermés. Je remercie vigoureusement les pionniers tels que Jean Jastrzebski, Eric Bahuet et Jean-Marc Belin qui m'ont initié et guidé dans ce nouveau monde sans bulle que j'affectionne tant.

Enfin, aucun projet n'aurait pris vie sans le soutien constant de mon épouse, Clara, qui est aussi devenue ma partenaire de plongée en recycleur. Qu'elle soit remerciée pour tous ses efforts et que nous puissions encore longtemps aller explorer en recycleur les tombants et les épaves qui nous font rêver.

Photo de couverture : plongeur Inspiration avec raie manta. Source : http://oceans-lefilm.com/

TABLES DES MATIERES

I. Introduction : principes généraux

La plongée loisirs telle qu'elle est pratiquée depuis une cinquantaine d'années a vu naître en son sein de grandes avancées, aussi bien en termes de matériels que de techniques et de progression pédagogique. Le « plongeur bouteille » tel qu'on l'appelle souvent évolue à présent dans un cadre réglementé dans lequel, pour peu qu'il dispose de la formation et du matériel idoines, les explorations jusqu'à 60 mètres sont réalisables avec un minimum de risques. En effet, le plongeur P3 moderne dispose de blocs pouvant être gonflés à 230 bars, de détendeurs fiables et performants à grande profondeur ainsi que d'ordinateurs permettant d'optimiser son temps de décompression en toute sécurité. L'arrivée du nitrox lui a aussi permis d'optimiser son temps de plongée sans paliers jusqu'à 40 mètres ou encore sa décompression pour les plongées entre 40 et 60 mètres. Notre plongeur P3 a donc l'impression de vivre un moment charnière de la plongée dite de loisir, où il peut jouir pleinement de nombreuses innovations mais où pointe parfois la frustration d'être arrivé aux limites de la plongée loisir telle qu'il la connaît : il est peu probable que dans un avenir proche le matériel ou de nouvelles connaissances de la décompression viennent chambouler le paysage actuel.

Ce mémoire s'intéresse tout particulièrement à ces plongeurs au minimum P3 confirmés afin de tenter de leur faire mieux connaître un autre type d'excursions subaquatiques, basées sur l'utilisation de matériels très différents de ce qu'il connaît : les recycleurs fermés électroniques. Le but de ce mémoire est donc de fournir une meilleure vision de ce qu'est la plongée loisir sur ce type de machines, de mieux en cerner les avantages tout en essayant de mieux comprendre les freins à son développement ainsi que les solutions envisageables pour une plus large adoption par les plongeurs en circuit ouvert.

Notre fédération, comme son nom l'indique a pour vocation l'étude et l'enseignement de toutes les activités subaquatiques de loisir. C'est déjà dans cette optique qu'ont été mis en place les cursus fédéraux sur Inspiration, premier recycleur fermé électronique distribué à grande échelle. Il s'agit à présent de continuer à faire évoluer nos techniques et notre pédagogie de pair avec le matériel afin de garantir à un nombre croissant de nouveaux plongeurs recycleurs une formation de qualité pour des plongées en sécurité. Ce mémoire s'adresse aussi à nos cadres fédéraux qui trouveront je l'espère matière à mieux comprendre l'évolution et les perspectives d'un type de pratique qui, même s'il reste restreint, n'en est pas moins en progression constante.

I.1 Historique

Même si l'utilisation des recycleurs en plongée loisirs est un phénomène récent, il est à noter que l'invention des recycleurs pour l'exploration subaquatique précède celle éminemment plus connue de Rouquayrol et Denayrouze concernant le scaphandre autonome (1864). C'est en 1808 que fut déposé le brevet de l'Ichtioandre par Sieur Touboulic. L'appareil consiste en une enceinte couvrant la tête et le tronc avec une ouverture pour le passage des bras. Un hublot permet la vision tandis que la respiration est assurée par une bouteille d'oxygène ouverte manuellement par le plongeur. Le CO2 expiré est capté par des éponges imbibées de chaux : le premier recycleur fermé était né. Le premier recycleur véritablement fonctionnel fût celui développé par Henry Fleuss et qui servit en 1880 lors de travaux fluviaux en Allemagne. En 1892 ce même recycleur est utilisé par Louis Boutan, un zoologiste français, pour effectuer des photographies sous-marines lors d'incursions de 3 heures jusqu'à 6 mètres de fond : c'est la première fois qu'un recycleur est utilisé pour la découverte scientifique du milieu marin.

Au début du XXème siècle, l'utilisation des recycleurs est l'apanage des militaires. Ils servent tour à tour d'appareil de sauvetage des sous-mariniers et de scaphandre pour les premiers nageurs de combat. Les recycleurs semi-fermés font leur apparition pour des plongées au nitrox jusqu'à 40 mètres. Après la deuxième guerre mondiale et le développement de la plongée off-shore, les matériels évoluent vers le trimix et servent de secours pour regagner les cloches de plongée en cas de coupure d'alimentation de l'ombilical.

Il faut attendre la fin du XXème siècle pour que le principe du recycleur fermé électronique voie le jour. La société Biomarine crée en 1970 le premier recycleur à commandes électroniques : le CCR-1000 destiné aux travaux sous-marins. Un modèle amagnétique adapté à l'US Navy en est dérivé en 1974, le Mark 15. Son successeur, le Mark16 est encore utilisé de nos jours par de nombreuses marines militaires.

C'est en 1984 que Bill Stone sort le cis-Lunar MK1 conçu pour les explorations sous-terraines extrêmes. Pesant plus de 90 kg, ce recycleur dérivé des scaphandres spatiaux permettait une autonomie de 24 heures et possédait une redondance de tous ses éléments. Il a été par la suite décliné en modèles plus compacts pour arriver au premier modèle commercial en 1994, le cis-Lunar MK4 vendu aux alentours de $15 000. Ce modèle a notamment été utilisé par le biologiste Richard Pyle pour étudier la faune entre 60 et 120

mètres et a posé les bases de tous les recycleurs fermés électroniques ainsi que de la plongée profonde en recycleur.



Photo du cis-Lunar MK4. On y retrouve tous les éléments des recycleurs électroniques modernes à savoir :

- un bloc de diluant air ou trimix (bouteille bleue)
- un bloc d'oxygène pur (bouteille verte)
- un canister de chaux pour filtrer le CO_2 (en gris)
- une « tête » électronique mesurant en continu la PpO_2 et contrôlant l'injection d'O_2 (en noir).
- un ordinateur gérant la décompression à PpO_2 constante

En 1997, la société anglaise Ambient Pressure Valves lance le Buddy Inspiration, premier recycleur fermé électronique conçu pour le grand public. Son prix inférieur à £4000 permet une diffusion plus massive, notamment sur le marché européen après sa certification CE (EN14143). A.P Valves crée en 2003 une filiale spécialisée dans la fabrication de ses recycleurs : A.P Diving. Suite au Buddy Inspiration renommé Inspiration Classic, A.P.D sort en 2005 une nouvelle série appelée Vision intégrant gestion du contrôle de la PpO_2 et décompression à PpO_2 constante. La gamme s'élargit de machines plus compactes : l'Evolution et plus récemment l'Evolution+. L'Inspiration est le premier recycleur fermé à bénéficier d'un cursus de formation à la fois chez les agences de plongée technique (IANTD, TDI, ANDI) et des fédérations nationales (BSAC, FFESSM). En France, l'accord de 2005 entre A.P.D et la FFESSM permet à cette dernière d'avoir son propre cursus de formation de plongeurs et de moniteurs basé sur les recommandations du constructeur.





Gamme d'A.P. Diving : De l'Inspiration Classic ne gérant que le contrôle de la PpO2 (à gauche) à la gamme Vision intégrant aussi la gestion de la décompression (à droite) (*source : www.apdiving.com*).

I.2 Définitions et principes de fonctionnement

Bien que ce mémoire ne porte que sur l'utilisation des recycleurs fermés électroniques, de grandes confusions subsistent généralement dans la population des plongeurs en ce qui concerne les recycleurs et il est indispensable d'expliquer les différences entre les grandes familles de recycleurs de manière à éviter toute confusion entre recycleurs fermés et semi-fermés ou entre recycleurs mécaniques et électroniques.

Un recycleur est avant tout un appareil respiratoire qui récupère les gaz expirés pour les réutiliser. Le CO2 produit par la respiration est capté dans une cartouche de chaux sodée (ou **canister**). La captation du CO2 se fait selon 3 étapes :

1. $CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$: le CO2 se combine à la vapeur d'eau pour former de l'acide carbonique
2. $2NaOH + H_2CO_3 \rightarrow Na_2CO_3 + 2H_2O$: la soude et l'acide carbonique se combinent pour former du carbonate de sodium et de l'eau
3. $Na_2CO_3 + CaOH_2 \rightarrow CaCO_3 + 2NaOH$: le carbonate de sodium se fixe à la chaux vive (hydroxyde de calcium) pour former du carbonate de calcium et de la soude.

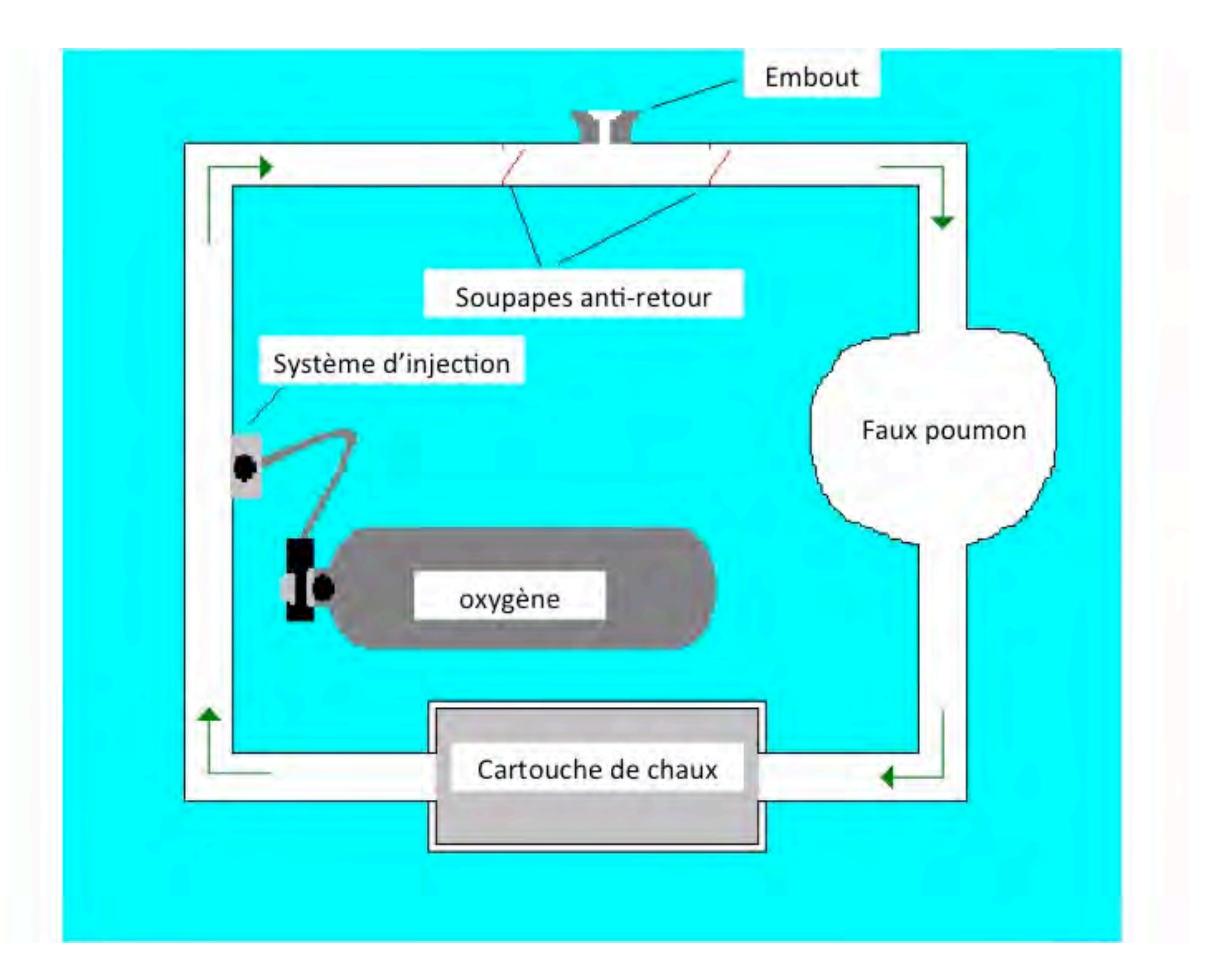
   Au final, la captation du CO2 par la chaux produit du carbonate de calcium sous forme solide, de la vapeur d'eau, de la soude ainsi que de la chaleur (réaction

exothermique). Le plongeur recycleur respire donc un mélange chaud et humide, contrairement au plongeur en circuit ouvert qui respire un air froid et sec du fait des cycles de compression et détente de l'air.

L'ensemble du circuit parcouru par les gaz dans le recycleur se nomme la **boucle**. Outre le canister, la boucle comporte un embout pour ventiler entouré de soupapes anti-retour pour définir le sens de circulation des gaz et éviter de respirer un mélange non filtré par la chaux.

Tous les recycleurs comprennent un ou deux sacs ventilatoires nommés **faux poumons** qui permettent une bonne homogénéisation des gaz ainsi qu'un volume plus que suffisant pour une inspiration ou une expiration du plongeur. L'ensemble de la boucle représente un volume constant de 5 à 12 litres puisque les gaz expirés ne sont pas rejetés dans le milieu : le plongeur recycleur ne dispose donc pas de la possibilité d'utiliser la technique du « poumon ballast » pour s'équilibrer.

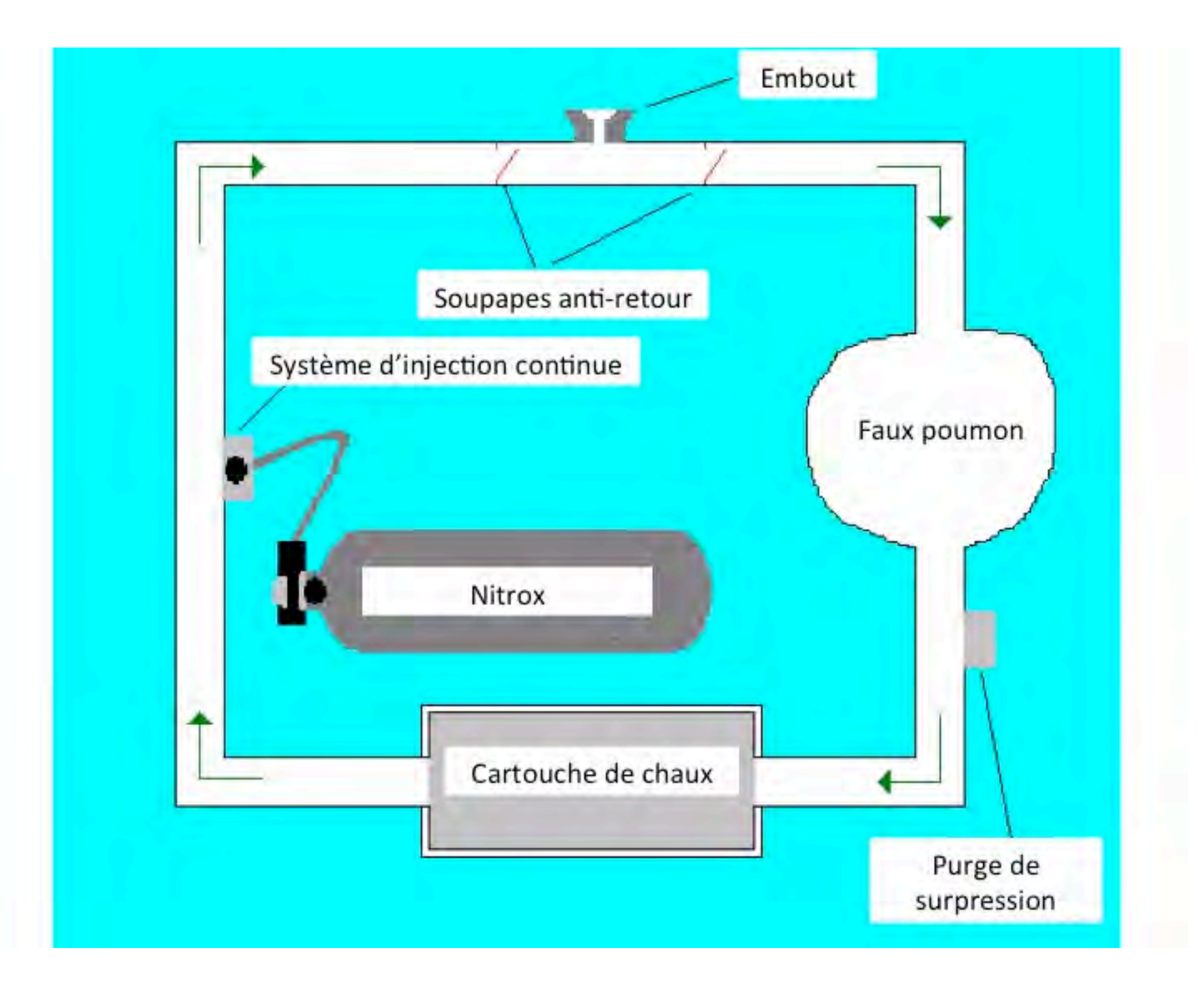
I.2.1 Le recycleur fermé (CCR)



Le principe d'un recycleur fermé est extrêmement simple : le plongeur respire de l'oxygène pur, les gaz expirés passent par un canister de chaux qui capte le CO2 produit. L'oxygène consommé est injecté dans la boucle soit manuellement, soit par une système d'injection à la demande qui se déclenche lorsque la boucle est en dépression. L'utilisation d'oxygène pur en limite l'utilisation à la zone des 6 mètres pour éviter tout risque d'hyperoxie (PpO2>1,6b). Le recycleur fermé est communément appelé **CCR** pour *Closed Circuit Rebreather*.



I.2.2 Le recycleur semi-fermé (SCR)



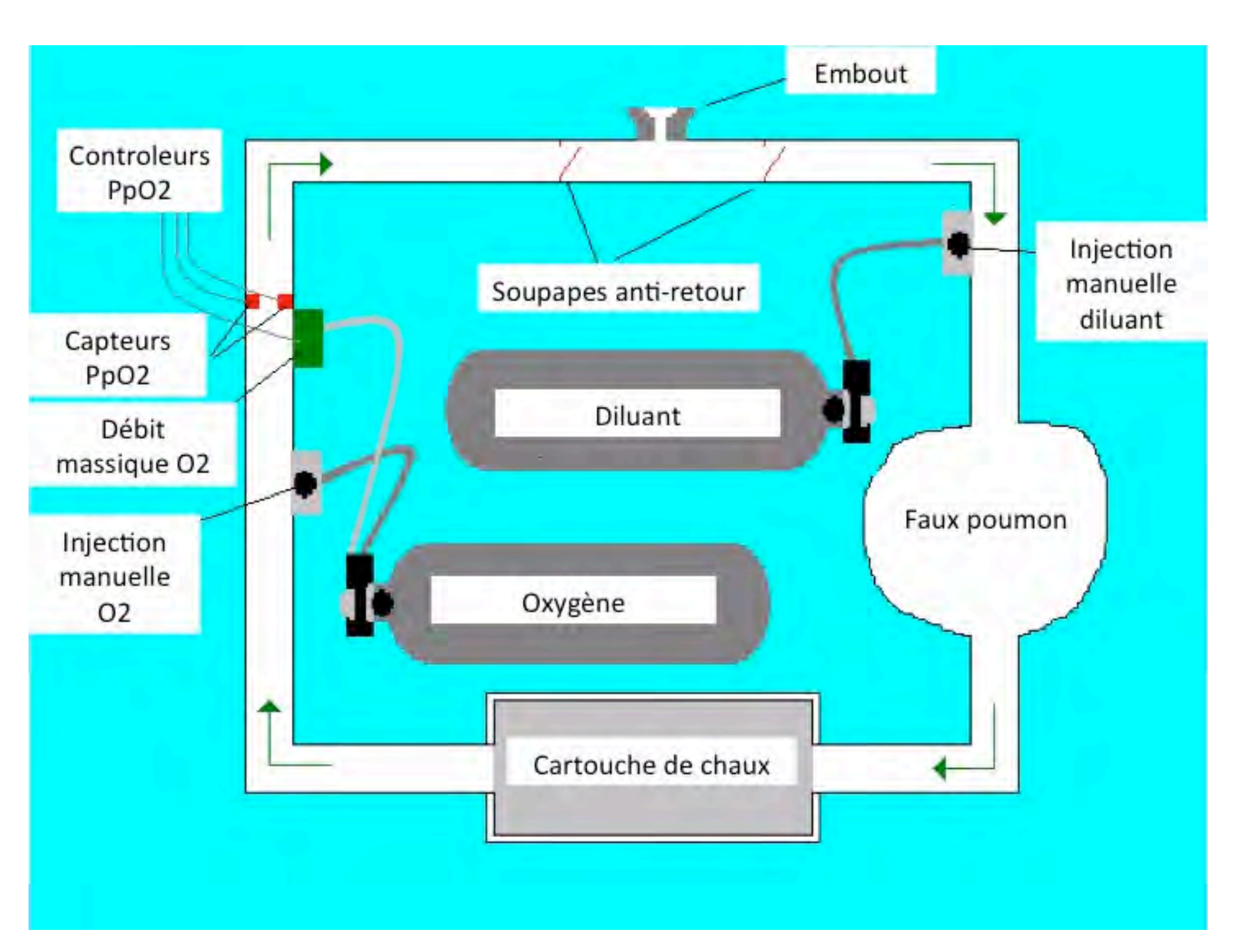
Dans les recycleurs semi-fermés ou **SCR** (*Semi-Closed Rebreathers*), le gaz respiré dans la boucle est un nitrox ce qui permet des incursions plus profondes qu'avec un CCR. Sur les SCR à débit actif, le débit est continu et fixé en surface par une buse (les SCR à débit passif sont généralement militaires). Le débit de l'injection étant prévu pour être supérieur à la consommation métabolique du plongeur, le trop plein de gaz dans la boucle est évacué en continu par une purge de surpression, d'où le terme de circuit semi-fermé. La profondeur maximale d'évolution est fixée par le nitrox utilisé. Sur un SCR comme le Dolphin de Draëger, le plongeur a le choix entre des buses correspondant à des Nitrox 32,40,50,60 ou 100% d'O2.

Chaque SCR est fourni avec des abaques qui permettent de calculer le pourcentage d'O2 effectivement respiré dans la boucle en fonction du nitrox utilisé, du débit de la buse et du métabolisme du plongeur.

Exemple : autonomie théorique du Dolphin en fonction du nitrox et de la buse choisis.

Nitrox	N32	N40	N50	N60
Profondeur max (1,6b de PpO2)	40m	30m	22m	16m
Débit injection	15.6l/min	10.4l/min	7.3l/min	5.8l/min
Bouteille 5l	64min	96min	136min	172min

I.2.3 Le recycleur fermé mécanique (mCCR)



Le recycleur fermé mécanique ou **mCCR** (manual Closed Circuit Rebreather) reprend le principe de fonctionnement du CCR, auquel il ajoute un bloc de diluant (air ou trimix ou héliox) afin de s'affranchir de la limite des 6m. A la descente, le plongeur injecte manuellement du diluant ou via un système automatique appelé **ADV** (*Auto Diluent Valve*) afin de maintenir le volume de la boucle constant et ce faisant dilue l'oxygène pur de la boucle. Une fois arrivé au fond, la consommation métabolique du plongeur (environ 1l/min d'O2 dans des conditions standard) est compensée par une buse à débit massique constant (MFC, *Mass Flow Controller*). En fait la buse à débit massique est réglée pour délivrer environ 0,8l/min d'O2 quelle que soit la profondeur. Le plongeur devra donc en cours de plongée contrôler régulièrement sa PpO2 et injecter manuellement le complément d'O2 pour maintenir une PpO2 proche de sa valeur cible (généralement 1,3b). Le contrôle de la PpO2 est assuré par 3 sondes O2 (aussi appelées cellules) indépendantes chacune branchée à un afficheur électronique.

A la remontée, la chute brusque de la PpO2 dans la boucle impose au plongeur une vigilance extrême et une injection manuelle fréquente d'O2 sous peine de tomber rapidement en hypoxie.

I.2.4 Le recycleur fermé électronique (eCCR) : cas de l'Inspiration Vision

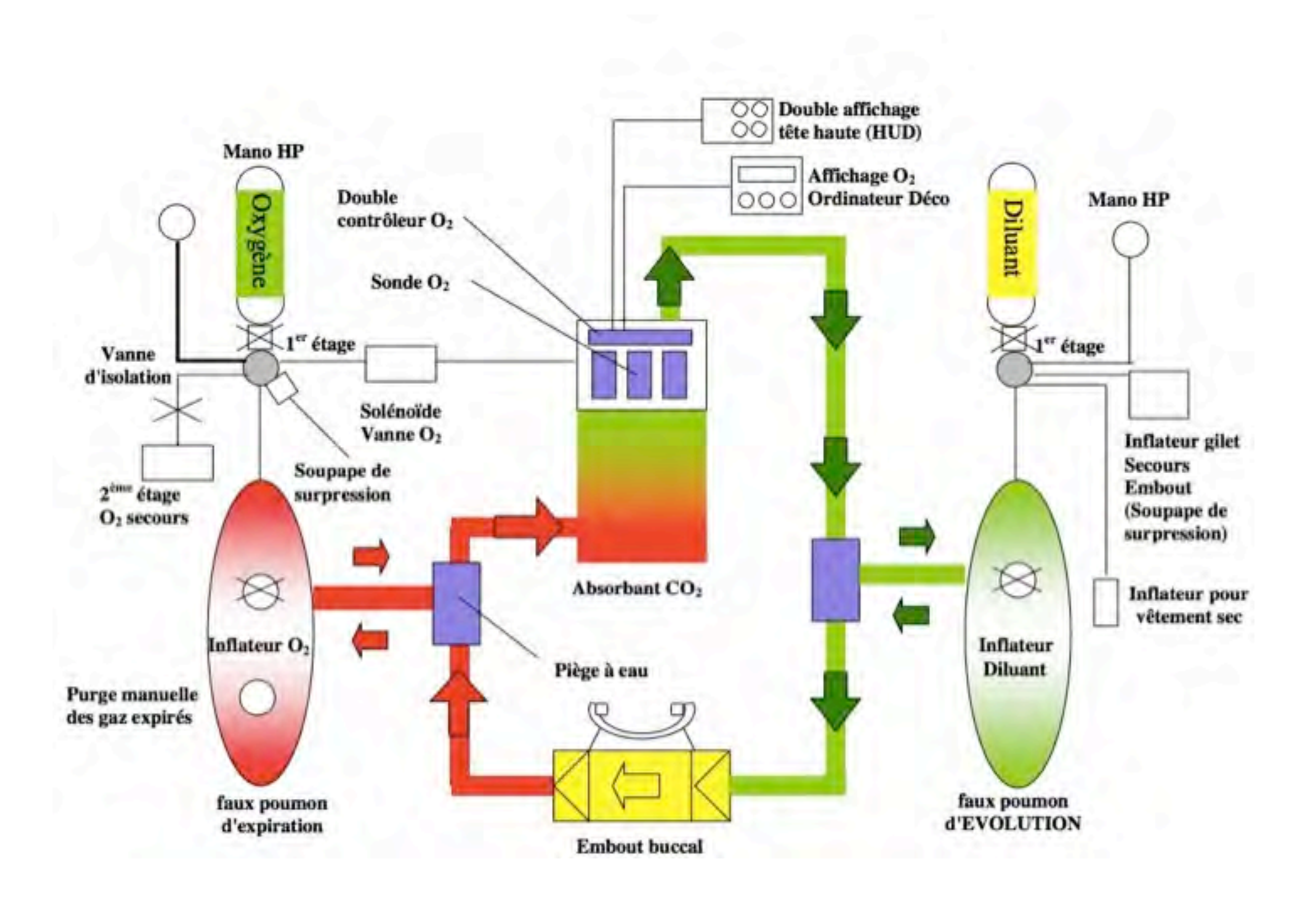


Schéma de principe du recycleur fermé électronique Evolution d'A.P. Diving.

Les recycleurs fermés électroniques ou **eCCR** (*electronic Closed Circuit Rebreather*) fonctionnent sur le même principe que les mCCR à la différence que la buse massique est remplacée par un contrôleur électronique relié à une électrovanne (souvent improprement appelée **solénoïde**) qui n'injecte que la quantité exacte d'O2 consommée par le plongeur. Ces machines sont aussi appelées recycleurs à PpO2 constante car l'électronique contrôle en permanence la PpO2 de la boucle et la maintient le plus proche possible de la valeur fixée par le plongeur. A la remontée, la chute de la PpO2 est détectée par les contrôleurs et l'électrovanne s'ouvre plus fréquemment et plus longtemps pour injecter davantage d'oxygène.

Dans le cas de l'Inspiration avec électronique Vision, il existe deux contrôleurs d'oxygène indépendants, C1 et C2 situés l'un à côté de l'autre dans la tête du filtre et scellés à vie pour résister à l'eau et aux vibrations. Une fois mis en marche et étalonnés, ces contrôleurs mesurent indépendamment la tension des sondes oxygène. Si C1 est alimenté par une pile et est relié à une sonde oxygène et au solénoïde, il sera le «Maître». Le contrôleur «Esclave», qui est normalement C2, surveille le Maître et prendra de lui-même le contrôle (Maître) si le Maître original venait à ne plus signaler sa présence à «l'Esclave». S'il le désire, le plongeur peut changer l'Esclave en Maître, à n'importe quel moment de la plongée. Le fonctionnement du recycleur est surveillé de façon indépendante par le contrôleur Esclave et les alarmes éventuelles sont générées indépendamment.

Une paire de LEDs est directement reliée de façon indépendante à chaque contrôleur d'oxygène; une verte et une rouge montée l'une au-dessus de l'autre au niveau d'un système d'affichage nommé **HUD** (*Head Up Display*). Le signal lumineux des diodes est transmis dans le champ de vision du plongeur par des fibres optiques en plastique. En temps normal, le plongeur voit deux voyants verts, l'un à côté de l'autre, un pour chaque contrôleur d'oxygène. Les LEDs sont capables de fonctionner avec de faibles tensions. Aussi, même lorsque la console bracelet est éteinte et que l'électrovanne ne se déclenche plus, les LEDs continuent de fonctionner et informent sur la valeur de la PpO2 ce qui permet au plongeur de pouvoir agir et de passer en mode d'injection manuelle.

Les contrôleurs régulent la PpO2 en fonction de deux valeurs préréglées appelées **setpoints**. Le **setpoint haut** correspond en règle générale à 1,3b de Pp O2 et est le setpoint utilisé pendant la majeure partie de la plongée. A la descente, 1,3b de PpO2 ne peut être atteint qu'à partir de 3m sous 100% d'O2. D'autre part un setpoint élevé en cours de descente ferait franchir mécaniquement la limite de 1,6b lorsque la pression ambiante augmente. Pour ces raisons on utilise un **setpoint bas** réglé sur 0,7b lorsqu'on est proche de la surface et lors des phases de descente. La machine peut basculer de setpoint automatiquement en fonction de profondeurs préétablies, soit manuellement par le plongeur.

I.2.5 Le recycleur fermé hybride ou à parachute électronique (hCCR)

Apparus plus récemment, les recycleurs fermés hybrides sont en fait des mCCR disposant d'un dispositif de parachute électronique à électrovanne afin de relever automatiquement la PpO2 lorsqu'elle chute en dessous d'un certain seuil (généralement 0,4b). Le but de ces recycleurs est d'adjoindre un système électronique de secours qui sera utilisé à la remontée si le plongeur est dans l'incapacité d'injecter lui-même l'oxygène nécessaire à sa survie. Il s'agit d'essayer de combiner les avantages présupposés des mCCR et eCCR, à savoir fiabilité mécanique et maintient automatique de la PpO2 au-dessus d'un seuil vital. De manière plus prosaïque, ces systèmes permettent à des mCCR de remplir avec succès les critères de la norme CE EN 14143 qui demande à ce que les machines puissent maintenir un niveau vital de PpO2 en toutes circonstances. Ce système a par exemple été adopté dans les dernières versions du rEvo III et du Submatix SMS 100.



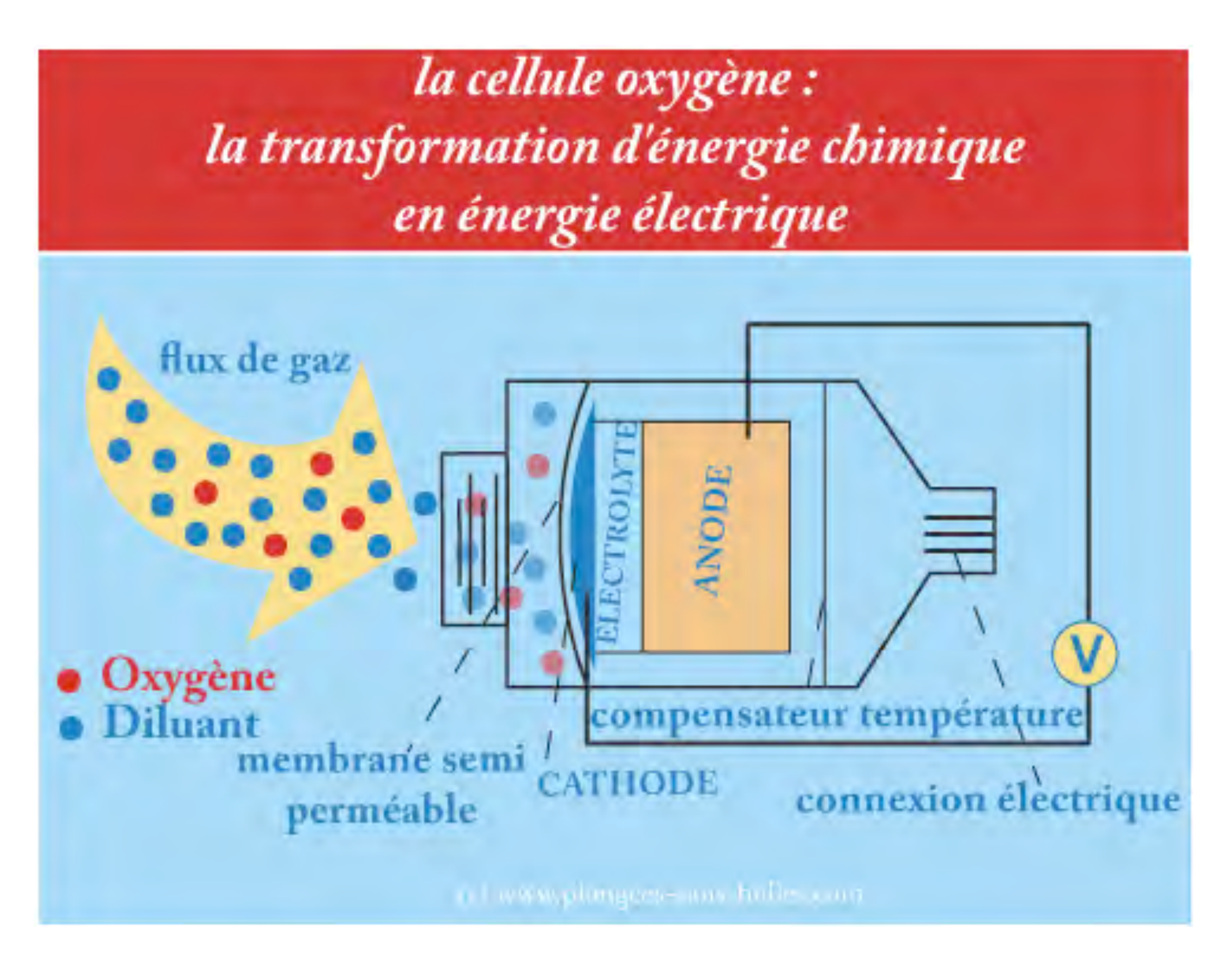
rEvo III : recycleur disponible en versions mCCR, hCCR ou eCCR. Les versions hCCR et eCCR viennent de recevoir en 2011 l'agrément CE pour la plongée avec un diluant air. Ce recycleur présente la caractéristique d'avoir deux canister disposés en série (derrière le couvercle jaune). Les faux poumons se situent en position dorsale et sont protégés par l'armature.

Source : www.revo-rebreathers.com

I.2.6 Le fonctionnement des sondes oxygène

Tous les recycleurs fermés autres que les recycleurs fonctionnant à l'O2 pur nécessitent l'analyse de la PpO2 pour fonctionner de manière sûre. Connaître à tout moment sa PpO2 est le premier réflexe à inculquer aux plongeurs débutants sur ces types de recycleurs. Alors que sur les mCCR l'affichage de la PpO2 permet au plongeur de savoir à quel moment il lui faut injecter manuellement de l'O2, sur les eCCR la mesure conditionne directement la régulation automatique de la PpO2.

Les sondes ou cellules O2 sont en fait des transducteurs qui transforment l'énergie chimique en énergie électrique. Les molécules d'oxygène de la boucle vont déclencher un mécanisme d'oxydo-réduction entre l'anode et la cathode produisant des électrons. La vitesse avec laquelle les molécules d'oxygène rentrent en contact avec la cathode détermine le courant de sortie. La vitesse est directement liée au nombre de molécules d'oxygène par unité de volume, soit la PpO2. Le courant généré étant faible, la sonde inclut aussi un convertisseur courant / tension et un amplificateur de tension. Enfin un dispositif de compensation de température assure une réponse linéaire malgré les fluctuations de température. Au final on a donc une tension de sortie directement proportionnelle à la PpO2. Cette tension sous 0,21 b de PpO2 est généralement comprise entre 8 et 13mV.



La tension en sortie de sondes varie avec la PpO2. Si la PpO2 augmente, la tension augmente. La tension varie d'une sonde à l'autre, même lorsqu'elles sont exposées à la même PpO2 et la pression atmosphérique varie continuellement. En conséquence, les sondes oxygène ont besoin d'être étalonnées avant chaque plongée afin d'appliquer un coefficient d'étalonnage qui leur permette de lire la bonne PpO2.

Sur les eCCR, l'étalonnage des sondes O2 avant la plongée est requis au moins une fois par jour et conseillé avant chaque plongée. Sur l'Inspiration, c'est une opération simple qui prend environ 45 secondes. A chaque étalonnage de l'oxygène pur est injecté dans la boucle à pression atmosphérique mesurée par la machine ; les coefficients d'étalonnage sont mémorisés pour une future analyse des sondes.

Même lorsqu'on ne l'utilise pas, à pression atmosphérique une sonde est toujours en train de fonctionner ce qui implique qu'elle possède une durée de vie limitée, comprise généralement entre 12 et 18 mois. Une sonde qui s'use ne permet plus de fournir une tension proportionnelle à la PpO2 et présente un effet plateau potentiellement dangereux s'il est en dessous de 1,6b de PpO2. Le risque est alors de voir apparaître des valeurs affichées de PpO2 normales alors que la PpO2 réelle est bien plus élevée, entraînant de ce fait un risque d'hyperoxie non décelable. Des caissons spéciaux permettent de déterminer les courbes dose/réponse des sondes O2 mais une simple mesure de la PpO2 à 6m à l'oxygène pur permet en début ou en fin de plongée de vérifier que la mesure s'approche de 1,6b.

I.3 eCCR : une démocratisation récente pour la plongée loisir

Aucune statistique officielle n'existe sur le nombre de plongeurs recycleurs en France ou dans le monde. Cependant la communauté en ligne la plus reconnue, rebreatherworld.com, compte plus de 31 000 membres inscrits et environ le double de visiteurs non inscrits selon ses statistiques. Ce qui permet d'estimer la communauté des plongeurs recycleurs ou s'y intéressant à environ une centaine de milliers de personnes dans le monde. La France semble y représenter environ 2% des inscrits en 2009 ce qui laisse à penser que le forum touche environ 2000 plongeurs français capables de lire l'anglais.

En ce qui concerne le type de recycleur utilisé, un sondage de 2009 montre que quasi 50% des plongeurs de cette communauté utilisent un eCCR, contre environ 40% pour les mCCR et moins de 5% pour les SCR.

Après un échec commercial des SCR, le marché semble à présent en croissance constante sur le segment des CCR sans être pour autant un raz-de-marée commercial.

I.4 Le recycleur fermé électronique au sein de la FFESSM

I.4.1 Historique et statistiques

La diffusion de la pratique et des formations eCCR a naturellement commencé par les agences de formation anglo-saxonnes du type IANTD ou TDI.

Comme toute histoire technologique et humaine, la pratique du eCCR au sein de notre fédération a commencé par un petit groupe de plongeurs passionnés et désireux de faire partager leur passion. On citera des vieux briscards du recycleur comme Jean Jastrzebski en région Bretagne-Pays de Loire ou Pascal Chauvière en région Est.

C'est en 2003 qu'Eric Bahuet présentait son mémoire d'instructeur national sur le thème de la plongée sans bulle. Il posait là les bases d'une formation fédérale sur eCCR. Après de maints efforts et discussions entre notre fédération et le fabricant Ambient Pressure Diving (A.P.D), un partenariat a été signé en 2005 permettant à la FFESSM de former plongeurs et cadres sur les machines d'A.P.D. En 2007 avait lieu à Niolon le premier stage de formateurs de cadres fédéraux sur Inspiration.

Des cartes double face FFESSM/CMAS sont à présent émises pour les trois niveaux de formation (plongeur Inspiration Vision Air, Trimix normoxyque et Trimix) et les trois niveaux de moniteur (moniteur Inspiration Air, Trimix et moniteur formateur).

Tableaux récapitulatif du nombre de cartes fédérales délivrées pour les formations SCR et eCCR (recycleurs APD) (source : rapport annuel 2010 de la CTN)

Qualifications recycleur semi-fermé :

	Total Hommes	Total Femmes	Total 2010	2009	2008	2007	2006
Plongeur recycleur	45	2	47	50	47	51	52
Moniteur recycleur	2	0	2	26	53	79	103
Total Recycleur			49	76	100	130	155

Qualifications recycleur fermé (Ambiant Pressure Diving):

	Total Hommes	Total Femmes	Total 2010	2009	2008	2007
Plongeur inspiration vision air	71	8	79	44	67	26
Plongeur inspiration vision trimix élémentaire	17	1	18	5	10	2
Plongeur inspiration vision trimix	9	2	11	6	12	13
Moniteur inspiration vision air	4	0	4	9	5	16
Moniteur inspiration vision trimix	1	0	1	4	2	12
Moniteur Formateur Inspiration Vision	0	0	0	6	0	3
Total recycleur fermé APD			113	74	96	72

A l'heure actuelle plus de 400 cartes tous niveaux ont été délivrées. Le cursus reste néanmoins ouvert à d'autres types d'eCCR pour peu que d'autres fabricants en montrent le désir car un seul groupe de compétences est propre à l'Inspiration. On note à partir de 2010

un fort retournement de tendance avec une chute importante du nombre de certifications fédérales SCR sans doute au profit des formations eCCR.

I.4.2 Le cursus fédéral eCCR

Le cursus fédéral eCCR se base comme toutes les agences de formation en eCCR sur trois niveaux dépendant du type de diluant choisi et prend en compte le cadre d'évolution de la plongée aux mélanges tel que décrit par le code du sport :

- Le premier niveau concerne le diluant air : le plongeur peut ainsi plonger au nitrox jusqu'à 40m qui est la limite conseillée par le fabricant sur ce type de diluant pour éviter tout risque de narcose et/ou d'essoufflement.

- Le deuxième niveau est accessible après 50 heures de plongées sur diluant air et concerne l'utilisation du trimix normoxique jusqu'à 70m, limite fixée par le code du sport

- Le troisième niveau concerne l'utilisation de diluant trimix hypoxique pour des plongées jusqu'à 120m selon le code du sport.

L'entrée en formation pour le diluant air nécessite d'être plongeur P3 nitrox confirmé. Pour les niveaux trimix élémentaire et trimix, la compétence trimix CO (Circuit Ouvert) peut être acquise en cours de formation.

Le cursus de formation comprend à chaque étape 4 groupes de compétences :

1. Connaissances théoriques communes

2. Gérer et utiliser un eCCR

3. Plongées avec un eCCR

4. Module spécifique Inspiration/Evolution

Ces 4 groupes de compétences sont tout à fait adaptés à la pratique du eCCR, il est cependant à regretter que seule la formation diluant air ait été détaillée. Il n'existe aucun contenu spécifique à l'enseignement du trimix normoxique ou hypoxique. Seules sont mentionnées les références aux contenus fédéraux des certifications en CO qui ne sont pas transposables en tant que tels au eCCR.

J'ai effectué un travail de recherche lors de ma formation de moniteur formateur eCCR trimix de manière à mieux définir les attendus d'une formation eCCR trimix élémentaire.

Le contenu de formation proposé est disponible en annexe VII.3 et reprend la structure de la formation CCR Air en y ajoutant le contenu de la formation Trimix élémentaire CO et en pointant les contenus supplémentaires nécessaires en CCR afin de pouvoir avoir des certifications conformes aux prérogatives des plongeurs eCCR trimix élémentaire.

II. Découvrir et faire le choix du eCCR

II.1 Avantages du recycleur fermé électronique

II.1.1 L'autonomie

Le principe même de fonctionnement d'un recycleur fermé est de n'injecter dans la boucle ventilatoire que la quantité d'oxygène consommée par le plongeur, le CO2 étant capté par une cartouche de chaux sodée. L'autonomie de la machine dépend donc directement de deux facteurs : la consommation métabolique d'O2 du plongeur et la capacité du filtre de chaux sodée à capter le CO2.

Dans des conditions d'effort modéré propres à l'exploration subaquatique, la consommation métabolique est d'environ 0,9 à 1l par minute d'O2. Un bloc de 2l d'O2 gonflé à 200b fournit donc une autonomie théorique de 400 minutes – soit plus de 6h – quelle que soit la profondeur d'évolution.

La capacité de fixation du CO2 de la chaux sodée dépend de nombreux paramètres comme la quantité, la température, la profondeur d'évolution voire même le mélange respiré. La norme EN 14143 définit toutefois des critères de sécurité et de comparaison entre les différents constructeurs. Les tests sont effectués pour un débit ventilatoire de 40l/min à 40m dans de l'eau à 4°C produisant 1,6l/min de CO2.

Dans ces conditions, le canister de 2,5kg de chaux Sofnolime 1-2,5mm de l'Inspiration est donné pour 180min d'autonomie et celui de 2kg de l'Evolution pour 120 minutes.

Au niveau physiologique, les recommandations de la N.O.A.A. (National Oceanic and Atmoshperic Administration) fixent à 180min la durée d'exposition à une PpO2 de 1,3b.

Tous pleins faits, un eCCR offre donc à son propriétaire environ 3 heures d'autonomie quelle que soit la profondeur, ce qui en soit permet d'envisager des profils de plongées inconnus jusque là en plongée loisir. Il n'est pas rare de couvrir en une seule plongée CCR l'équivalent de 3 sites de plongée en circuit ouvert.

II.1.2 Une décompression optimisée

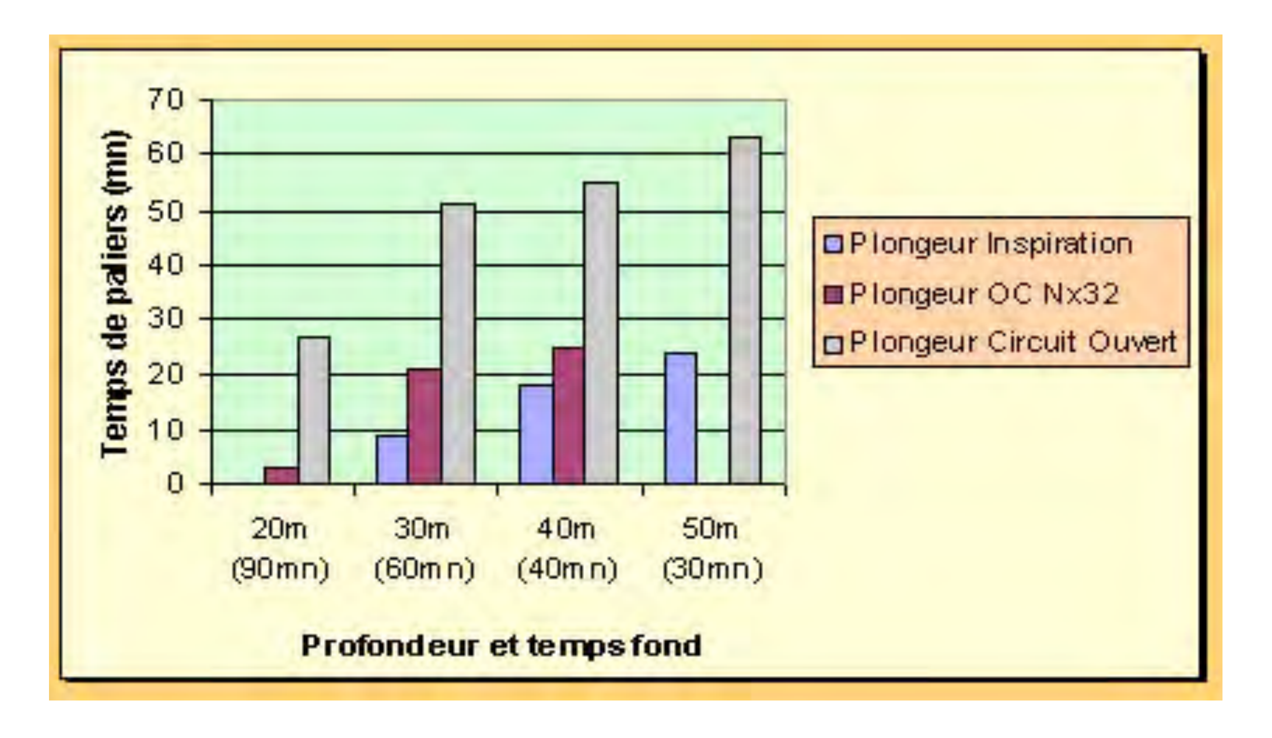
Le propre d'un eCCR est, comme nous l'avons vu, de fonctionner à PpO2 constante : la machine fabriquera donc automatiquement le mélange ayant la plus grande fraction d'O2 possible (et donc la plus faible fraction de N2) tout au long de la plongée en fonction du setpoint haut (habituellement 1,3b). Lorsque le plongeur utilise de l'air pour diluant, l'eCCR fabrique à chaque instant le nitrox le plus optimisé pour sa profondeur d'évolution.

Exemples de Nitrox respirés par le plongeur CCR pour un setpoint de 1,3b

Profondeur	10m	20m	30m	40m
Nitrox respiré	65%	43,3%	32,5%	26%

Le CCR permet en outre de rincer la boucle afin de passer sur oxygène pur au palier à 6m.

La décompression à PpO2 constante avec O2 pur à 6m représente le mode de décompression le plus optimisé. Elle évite de plus les sauts brusques de PpO2 ou de PpN2 que l'on peut avoir en plongées aux mélanges lors des phases de changement de bloc de décompression.



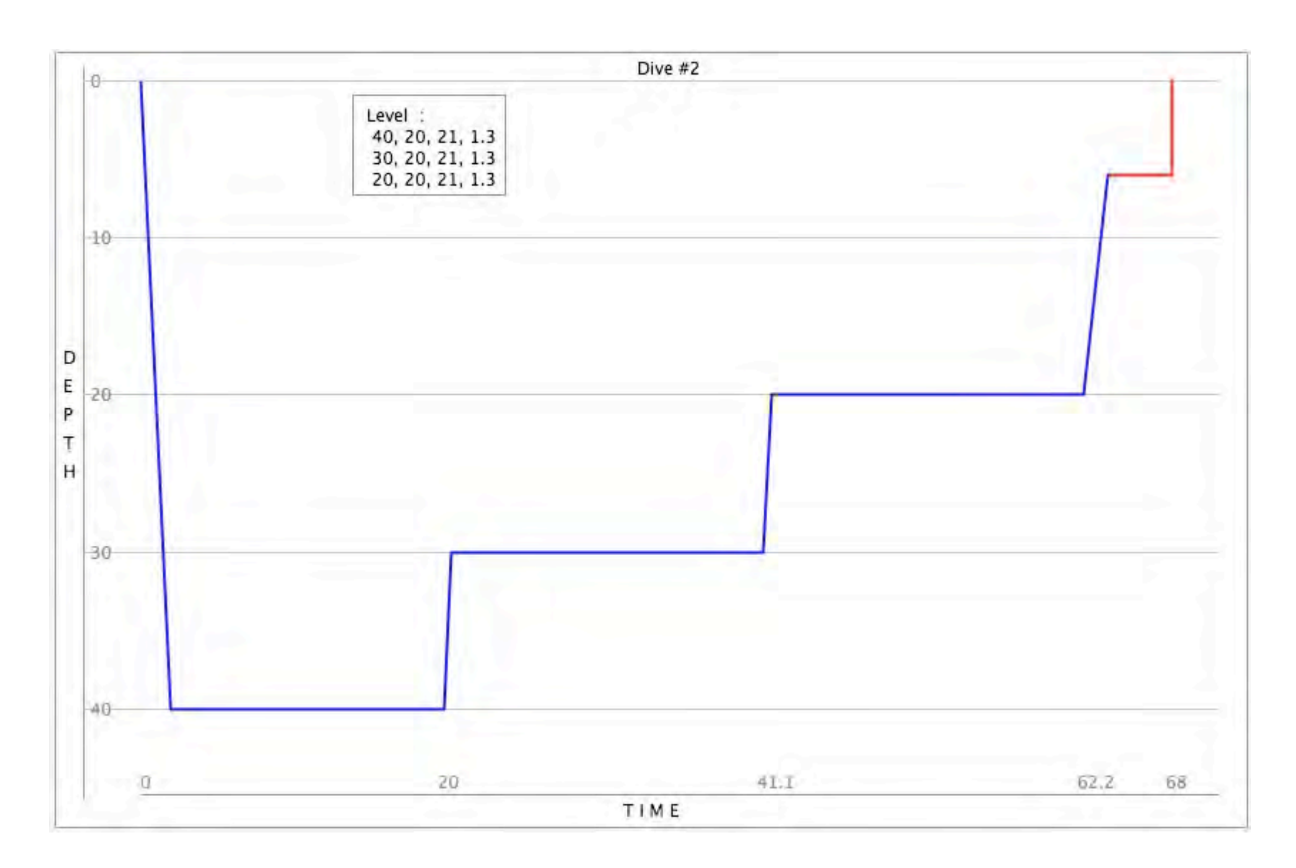
source : recycleur.free.fr

Le schéma ci-dessus montre les écarts importants en terme de décompression entre des plongées à l'air, au N32 ou en eCCR (avec setpoint 1,3b). On peut ainsi rester 1h30 à 20m en CCR en étant encore dans la courbe de sécurité à PpO2 constante. L'utilisation des CCR dans la zone des 30-40m est particulièrement intéressante puisque pour la même plongée de 60min à 30m on note plus de 40min d'écart sur la décompression entre le CCR et la plongée à l'air et encore 11min d'écart avec un N32. Une plongée de 40min à 40m ne donne que 18min de paliers en CCR alors qu'avec plus de 55min de paliers à l'air elle devient quasiment inenvisageable. Dans de telles conditions, l'écart avec un N32 se réduit à 40m du fait de la chute de fraction O2 dans la boucle pour maintenir la PpO2, le plongeur eCCR ne gagnant plus que 7min de palier sur le N32.

L'exploration d'épaves dans la zone des 30-40m en eCCR devient alors particulièrement intéressante et terme d'optimisation de décompression.

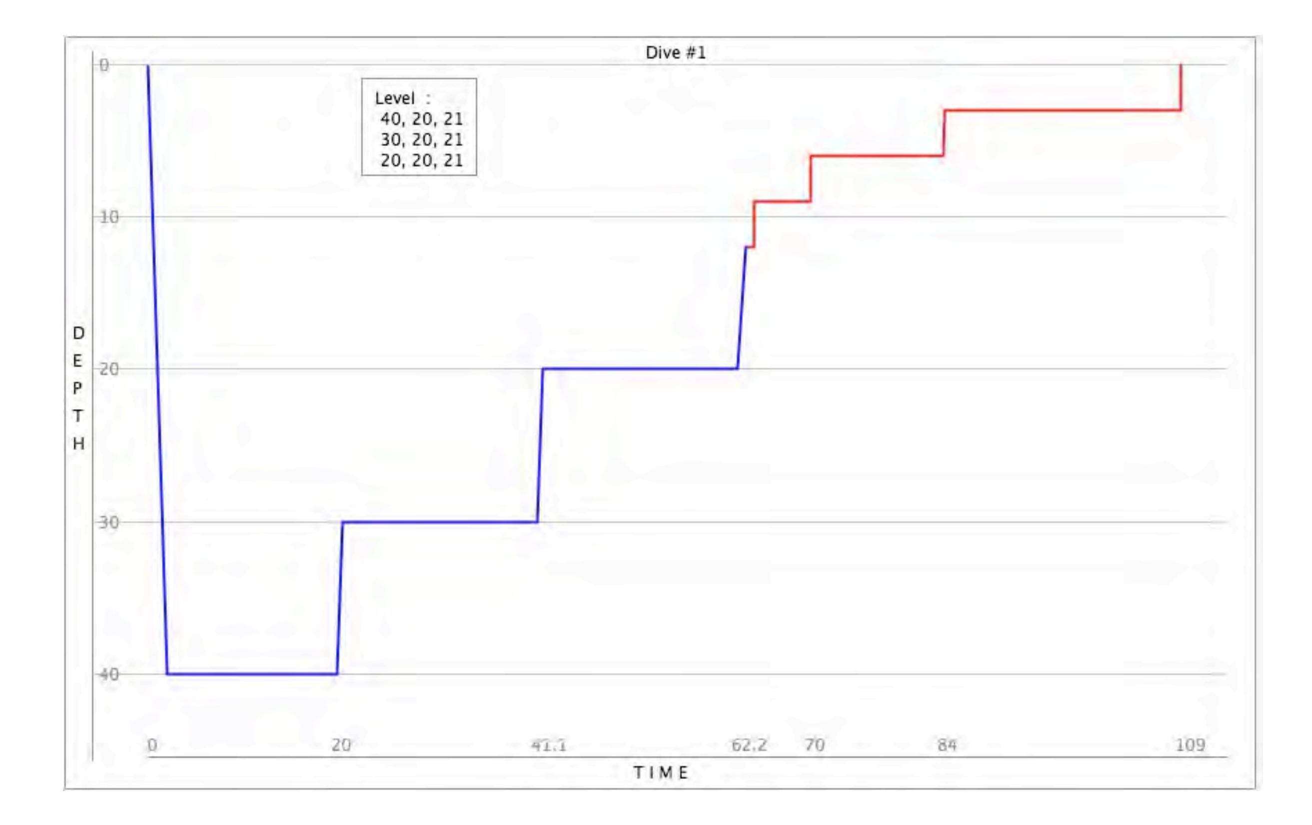
Ce qui est vrai dans le cas de plongées carrées devient encore plus flagrant lors de plongées multi-niveaux puisqu'à chaque fois que le plongeur CCR remonte, son mélange s'enrichit en O2. Les plongées en CCR sur tombants permettent de réduire considérablement le temps de paliers tout en optimisant l'exploration.

Si l'on prend par exemple le cas d'une plongée multi-niveaux courante en eCCR de 20min à 40m, 20min à 30m et enfin 20min à 20m. Une simulation sous le logiciel de décompression V-planner en utillisant l'algorithme VPM-B et un niveau de conservatisme +2 nous donne les résultats suivants :



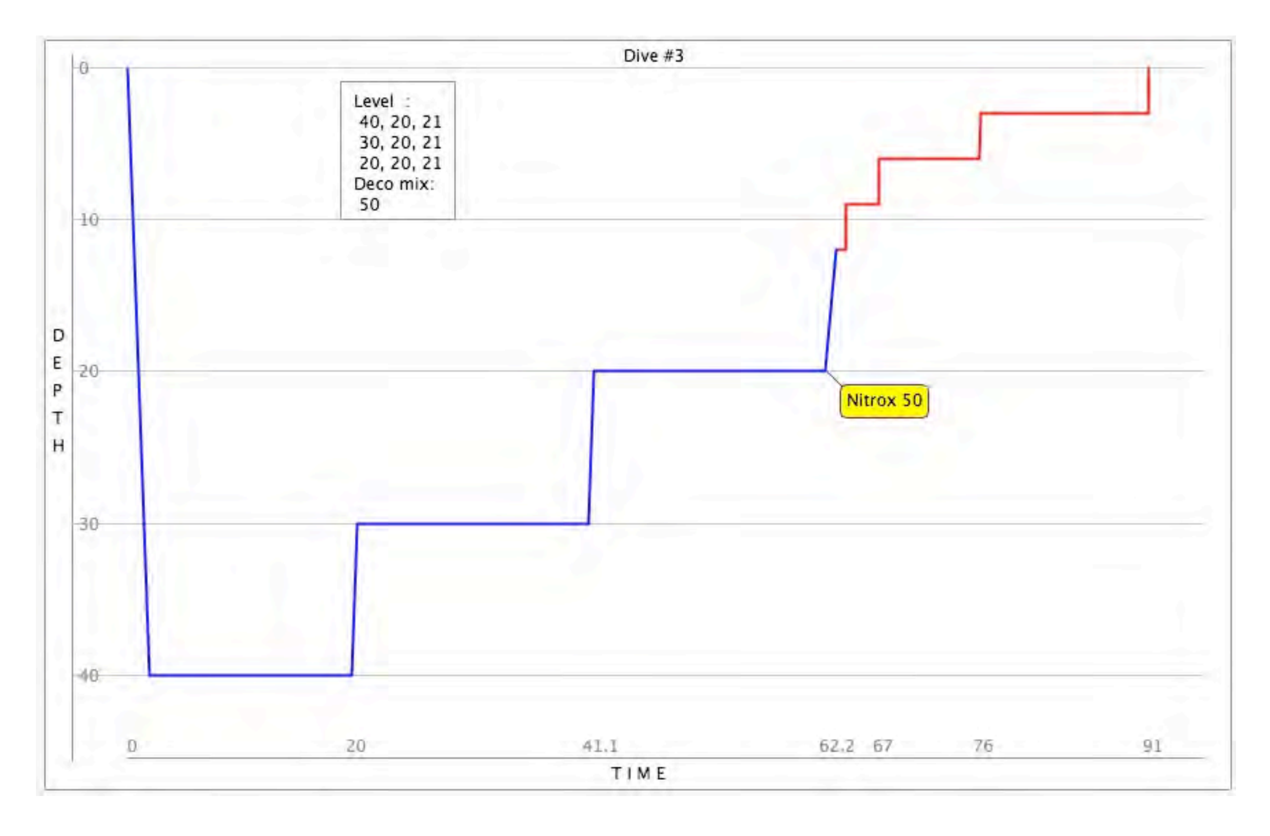
Le temps de paliers estimé est de 4min à 6m pour un temps total de plongée de 68min. Cette plongée correspond à une charge de 99 OTU et un CNS de 37% ce qui reste loin des limites de la toxicité O2.

La même plongée à l'air donne le profil suivant :



Le temps total d'immersion passe alors à 109min avec un temps de paliers de 45min. Si l'on se base sur une consommation de 20l/min, le volume de gaz à emporter est supérieur à 6m^3.

Enfin la même plongée à l'air avec un bloc de décompression au nitrox 50 donne le profil suivant :



Le temps total d'immersion est alors de 91min pour 28min de paliers et cette plongée nécessite 4,8m^3 d'air et près de 800l de nitrox 50.

II.1.3 Le véritable monde du silence…sauf pour les bavards

Une des premières sensations qui saisit le plongeur CCR lors de sa première immersion est le silence quasi total qui l'entoure dû à l'absence de détente et de pièce en mouvement dans la machine. Seul subsiste un léger bruit de ventilation pour peu qu'il plonge entre recycleurs. Ce phénomène augmente la sensation d'osmose avec le milieu.

A l'inverse, le volume important de la boucle peut servir de caisse de résonnance pour articuler quelques syllabes dans l'embout et communiquer de façon à peu près compréhensible entre plongeurs CCR.

II.1.4 Un mélange moins agressif

L'air respiré en circuit ouvert provient d'une première phase de compression lors de laquelle il perd une grande partie de son humidité puis d'une phase de détente en immersion lors de laquelle il perd de nombreuses calories. La ventilation buccale ne permet pas à l'air de passer par les fosses nasales avant d'arriver aux poumons, il s'en suit que le plongeur CO (Circuit Ouvert) respire un air froid et sec.

La réaction exothermique de la fixation du CO2 par la chaux ainsi que le dégagement d'eau rendent au contraire le mélange inspiré par le plongeur CCR beaucoup moins agressif pour l'organisme. Cet effet est d'autant plus marqué que l'eau est froide et/ou la plongée longue : le plongeur CCR perd moins de calories au niveau pulmonaire et résiste mieux au froid.

En eau très froide, l'absence de détente de gaz évite de plus les problèmes éventuels de givrage.

II.1.5 L'approche de la faune

Comme nous l'avons vu précédemment, la ventilation en CO est bruyante comparée au milieu où le plongeur évolue et peut déranger la faune. Les biologistes s'accordent à dire qu'en règle générale chez les mammifères sous-marins l'expulsion de bulles est signe de mécontentement voire d'agressivité. Tous les plongeurs CO ont déjà expérimenté que pour approcher la faune de plus près il faut généralement retenir sa respiration. Le plongeur CCR n'émet pas de bulle s'il n'est pas en phase de remontée. Lors de ses premières plongées, il parcourt généralement des sites déjà connus et peut remarquer à quel point la faune adopte un comportement différent à son contact : les distances d'approche sont plus courtes et on peut facilement se fondre dans le milieu. Il m'est ainsi arrivé de me trouver au milieu d'un

banc de barracudas en pleine chasse sans qu'aucun d'entre eux ne semble en être perturbé. Une plongée sur des épaves déjà connues en CO revêt une nouvelle dimension en CCR : les épaves paraissent bien plus poissonneuses lors d'incursions entre recycleurs. Si jamais des palanquées en CO arrivent sur site en même temps, on voit alors les alentours se dépeupler … jusqu'à la remontée des plongeurs en CO…

Au final il apparaît que l'eCCR est véritablement taillé pour l'exploration en permettant tout à la fois d'approcher la faune au plus près, d'augmenter la durée et l'espace d'évolution tout en minimisant le temps de décompression.

II.2 De l'utilisation professionnelle à l'utilisation loisirs

Issus du monde militaire, les recycleurs fermés électroniques ont été tout d'abord adoptés par des professionnels des travaux sous-marins ou des scientifiques pour aller travailler dans la zone des 60-100m sans devoir embarquer des volumes de gaz trop importants avec eux. Les eCCR ont ainsi grandement ouvert l'espace d'exploration en plongée. Des photographes ont suivi le pas, enthousiasmés par le silence et l'absence de bulle rendant la prise de clichés ou le tournage de films plus aisés. En France, le biologiste et photographe Laurent Ballesta utilise l'eCCR comme outil de choix pour aller explorer les richesses sous-marines entre 100 et 200m. Il a ainsi pu découvrir de nouvelles espèces ou aller filmer et photographier pour la première fois une espèce préhistorique : le coelacanthe. Les possibilités des CCR ont révolutionné la plongée spéléo. Associés aux scooters sous-marins ils ont permis malgré des organisations logistiques réduites des pointes inimaginables jusqu'à la fin du siècle dernier. Les plongeurs dits tek utilisent les eCCR depuis une dizaine d'année pour aller explorer des épaves auparavant inaccessibles. La plongée en recycleur fermé a hérité de ses pionniers une image 'Tek', une réputation de pratique réservée à un petit groupe de plongeurs avertis. Se cantonner à cette image serait sous-estimer grandement les progrès des matériels ainsi que des formations spécifiques qui permettent véritablement à présent d'aborder la pratique du recycleur fermé sous un angle purement loisir. De nombreux clubs aux Maldives ou en Egypte proposent à présent des formations pour des plongeurs se cantonnant à 30-40m de fond.

PADI ne s'y est pas trompé puisque vient de sortir en 2011 un nouveau cursus « PADI recreational CCR » adapté aux plongeurs voulant rester dans la courbe de sécurité du recycleur à PpO2 constante, jusqu'à 40 mètres. Ce type de stratégie commerciale a créé un véritable intérêt de la part des fabricants qui ont été sollicités pour ouvrir le marché du CCR grand public avec des produits plus simples à gérer car plus automatisés. Ainsi A.P. Diving vient de sortir une nouvelle version du logiciel adapté à ce type de public où par exemple le plongeur n'a plus à régler le setpoint : la machine fait évoluer la valeur de la PpO2 en

fonction du profil de la plongée. L'arrivée d'une machine comme le Poséidon Mark 6 vise clairement le plongeur air classique, bien loin des stéréotypes des plongeurs teks.

II.3 Choix de la machine

Un des premiers problèmes pour le plongeur confirmé qui souhaite passer au eCCR est de pouvoir avoir accès à une machine et d'en choisir une puisque les formations sont spécifiques aux machines. Si les machines peuvent être en règle générale louées durant la formation initiale, il s'avère vite nécessaire de procéder à un achat car le marché de la location est quasi inexistant et le débutant découvre que la pratique régulière est une condition sine qua non à la plongée en sécurité en eCCR.

Le premier critère de choix du plongeur français voulant pouvoir plonger en club est la norme CE EN14143. Sans une machine aux normes, le plongeur se retrouverait condamné à plonger hors structure puisque le code du sport (article A. 322-98) impose l'utilisation de recycleurs « aux normes en vigueur ». La responsabilité du directeur de plongée a d'ailleurs été récemment engagée lors d'accidents impliquant des recycleurs non conformes aux normes dans le cadre d'une utilisation club. La première machine eCCR normée CE fut l'Inspiration ce qui explique en partie le succès commercial d'A.P. Diving. VR Technology a suivi de peu avec des machines comme l'Ouroboros ou plus récemment le Sentinel. La certification CE impose aux fabricants des conditions drastiques de tests et un coût d'investissement qui a longtemps rebuté les fabricants artisanaux. Récemment d'autres eCCR ou hCCR ont reçu le label CE, il s'agit du Submatix allemand, du rEvo belge ou encore du Megalodon américain. Tous ces nouveaux modèles CE élargissent le choix qui se présente à un débutant mais ne le rendent pas forcément plus simple. Les forums de discussions sur internet regorgent d'échanges sans fin à ce propos. De nombreux critères sont à prendre en considération comme les capacités techniques, le coût, la proximité du service après vente ainsi que le cursus de formation et l'instructeur. Le but de ce mémoire n'est pas de rentrer dans des comparaisons détaillées entre les différentes machines mais de mettre en évidence qu'il vaut mieux que le débutant soit accompagné de plongeurs avertis et si possible impartiaux pour faire un choix cohérent avec le type de plongées qu'il envisage.

Au niveau fédéral, il n'existe à ce jour de cursus que pour les machines d'A.P. Diving car pour l'instant les autres fabricants préfèrent passer exclusivement par des structures commerciales pour diffuser leurs produits et former les nouveaux acquéreurs.

Dans tous les cas et en dehors de critères purement techniques, il serait bon que l'acheteur potentiel puisse pratiquer régulièrement au sein d'une communauté de plongeurs disposant

de la même machine afin de pouvoir bénéficier d'un réseau d'entraide et de conseils quant à l'entretien et à l'utilisation de leur machine.

II.4 Accès à l'instructeur

De même qu'en plongée bouteille, le débutant en CCR pourra choisir de se former via une structure commerciale ou une structure associative pour l'Inspiration. Tous organismes confondus, le site d'A.P.D. recense pour la France 53 instructeurs au mois d'octobre 2011. Cela peut sembler suffisant mais en réalité certains instructeurs ne sont plus en activité ou sont partis travailler à l'étranger.

Au niveau FFESSM, on compte 34 moniteurs Inspiration Air formés au 31/12/2010. La situation est plus difficile au niveau de la région Ile de France-Picardie puisque parmi les 6 moniteurs formés, certains n'enseignent pas ou bien en-dehors de la région. Un seul est véritablement en activité, ce qui pousse bon nombre de plongeurs à aller se former en dehors de notre région. Le développement de la plongée fédérale sur Inspiration en Ile-de-France doit donc impérativement passer par la formation de nouveaux cadres actifs et de formateurs de moniteurs afin de pouvoir répondre à la demande croissante des plongeurs.

Un moniteur Inspiration est forcément au minimum un moniteur E3 en CO. En milieu associatif, le formateur Inspiration effectue généralement les formations eCCR en plus des formations techniques traditionnelles. Chaque stage de formation au diluant air nécessite au moins 4 jours et il paraît difficilement envisageable pour un moniteur eCCR de prendre plus de deux élèves à la fois. En fonction du nombre de sessions envisagé, chaque moniteur Inspiration en milieu associatif formera donc généralement entre 2 et 4 plongeurs par an, ce qui laisse la plupart du marché aux structures commerciales et maintient des coûts de formation élevés, aux alentours de 1000 euros sans compter les consommables (chaux sodée, oxygène…)

II.5 Gérer les coûts

II.5.1 Coûts d'acquisition

Un eCCR représente un coût d'acquisition important qui reste un frein au développement de l'activité. Une machine de type A.P. Inspiration toutes options et prête à plonger coûte entre 6500 et 7000 euros en fonction des options choisies et du cours de la Livre. D'autres machines peuvent atteindre jusqu'à 10 000 ou 12 000 euros. L'évolution des prix des eCCR ressemble à celle du matériel informatique : les prix ne baissent pas mais les produits s'améliorent pour des coûts d'acquisition constants.

Il faut toutefois comparer des choses comparables et si un plongeur P3 veut s'équiper en circuit ouvert pour effectuer des plongées longues et/ou profondes du même type que ce qu'il peut effectuer en eCCR, l'addition est aussi importante. On pourra par exemple prendre une configuration du type :

- Bi acier 2x10l : 600 euros
- Gilet de stabilisation de type wing Diverite : 600 euros
- Ordinateur multigaz trimix : 1000 euros
- 2 détendeurs compensés pour plongées profondes : 800 euros

Au final à 3000 euros, une bonne configuration de plongée profonde en CO coûte environ 40% du prix d'un eCCR. Pour des plongeurs désireux d'évoluer vers le trimix, le coût de l'hélium (environ 40 euros le m^3) devient vite rédhibitoire : une plongée à 70m avec un 15l gonflé au trimix 18/50 fera dépenser 60 euros juste pour le gonflage. Pour le plongeur CCR, le coût de gonflage pour la même plongée sera aux alentours de 8-10 euros oxygène compris.

II.5.2 Coûts de fonctionnement et d'entretien

Si le prix d'acquisition d'un eCCR reste élevé, le coût de fonctionnement et d'entretien reste en revanche relativement raisonnable. On pourra tabler sur les coûts suivants pour une machine de type Inspiration :

- Chaux de type Sofnolime : entre 3 et 4 euros pour 1 heure de plongée
- Piles : environ 20 euros pour 20 heures d'autonomie
- Oxygène : environ 3 euros l'heure de plongée

Le surcoût des consommables par rapport à une plongée d'une heure à l'air est donc d'environ 8 euros.

L'entretien courant nécessite juste de changer quelques joints. Le coût d'entretien est essentiellement dû au changement des sondes O2 tous les ans, soit environ 180 euros.

Un problème au niveau de l'électronique ne pourra par contre être réglé que par un renvoi au fabricant et fera gonfler la note de l'entretien annuel de manière significative.

III. Se former au eCCR

Le plongeur eCCR débutant dès son baptême perçoit qu'il va lui falloir réapprendre beaucoup des fondamentaux auxquels il ne faisait même plus attention en circuit ouvert. Il doit s'inscrire à nouveau dans une véritable démarche d'apprentissage pour mieux connaître sa machine et être capable de l'utiliser en toutes circonstances, voire de pallier aux problèmes pouvant subvenir.

III.1 Connaissance et préparation du matériel

De par sa formation, le plongeur P3 en circuit ouvert a déjà une certaine connaissance du matériel mais qui ne va que peu lui servir lors du passage en eCCR. Dès les premières séances de formation, il va devoir monter et démonter sa machine avec l'aide de son instructeur de manière à mémoriser les différentes pièces et leur utilité ainsi que de pouvoir effectuer l'entretien courant tel que le changement de joints, de piles ou de cellules oxygène.

Si la préparation d'un scaphandre en circuit ouvert est une opération simple nécessitant peu d'étapes, il en va autrement en recycleur où elle constitue l'élément majeur de prévention des risques. Bien des accidents auraient pu être évités si la préparation avait été effectuée selon les règles. Pour un plongeur eCCR débutant, il n'est pas rare que la préparation de la plongée nécessite de 20 à 30 min de préparation avant la plongée. Une fois expérimenté, il lui faudra tout de même 5 à10 min pour préparer sa machine. C'est une opération qu'il faut effectuer au calme, avant d'embarquer sur le bateau et sans être interrompu pour éviter les erreurs. Dans tous les cas, on n'endosse pas un recycleur juste avant de passer à l'eau comme on peut le faire avec un bloc. Il existe différents moyens mnémotechniques pour se souvenir de toutes les étapes de préparation mais le moyen le plus efficace reste encore la check list, comme dans le domaine aéronautique où l'on inspecte la machine et où on effectue les procédures de sécurité avant le décollage. Le débutant en eCCR doit véritablement apprendre à se plier à cette discipline. Des problèmes peuvent parfois réapparaître avec le temps lorsque le plongeur plus expérimenté se permet des raccourcis ou n'est plus aussi attentif à la préparation de sa machine.

III.1.1 Remplissage

L'élève vérifie la nature du gaz et la pression de chacun de ses blocs : O2 pur pour le bloc d'oxygène et air (ou trimix) pour le bloc de diluant. Même si un recycleur ne consomme que quelques dizaines de bars de diluant et d'O2 par plongée, l'élève apprendra à partir avec une réserve de gaz plus que suffisante pour la plongée considérée, en général au moins 100 bars de diluant et 100 bars d'O2.

III.1.2 Connexions

Il s'agit de vérifier que l'ensemble des éléments du recycleur sont bien connectés : blocs, inflateurs manuels, direct system, ADV, tuyaux annelés… L'élève apprend à faire méthodiquement le tour des connexions de sa machine et à vérifier que tout est en état de marche. En ce qui concerne le bloc d'oxygène et tous les éléments en contact direct avec l'oxygène pur, il faudra veiller à n'utiliser que de la graisse compatible O2 pour éviter tout risque d'inflammation lors de l'ouverture du bloc d'O2. L'ouverture du robinet doit être très progressive et un seul tour suffit car le plongeur devra pouvoir fermer très rapidement le bloc durant l'immersion, en cas de risque d'hyperoxie due à une injection continue d'O2. Là encore, un geste classique de la plongée CO, à savoir l'ouverture à fond avec quart de tour à la fin, n'est pas adapté et devra être banni.

III.1.3 Etanchéité

C'est une étape clé puisqu'un circuit fermé ne peut le rester que si l'étanchéité de la boucle est parfaite. L'avantage est que puisque la boucle fonctionne toujours à pression ambiante, cette étanchéité est plus facile à réaliser que pour des caissons étanches par exemple. Deux tests doivent impérativement être exécutés pour vérifier l'étanchéité de la boucle avant la plongée :

- Le **test positif** : il s'agit de mettre la boucle en surpression en la gonflant au maximum et en fermant l'embout. Les faux poumons doivent rester bien remplis et fermes pendant quelques minutes pour que le test soit validé. Ce test permet d'identifier d'éventuels joints manquants ou mal positionnés, ou des tuyaux mal vissés qui laisseraient immanquablement fuir la boucle. Le test positif permet de vérifier que l'air ne peut pas s'échapper de la boucle lorsqu'elle est fermée.

- Le **test négatif** : c'est le test le plus crucial car il permet de vérifier que l'air extérieur ne peut pas pénétrer dans la boucle lorsqu'elle est fermée. Pour l'effectuer on inspire à la bouche le gaz de la boucle de manière à créer une dépression puis on expire par le nez tandis qu'on ferme la boucle. Pour être concluant, les tuyaux de la boucle doivent rester écrasés durant quelques minutes par la dépression créée.

III.1.4 Etalonnage

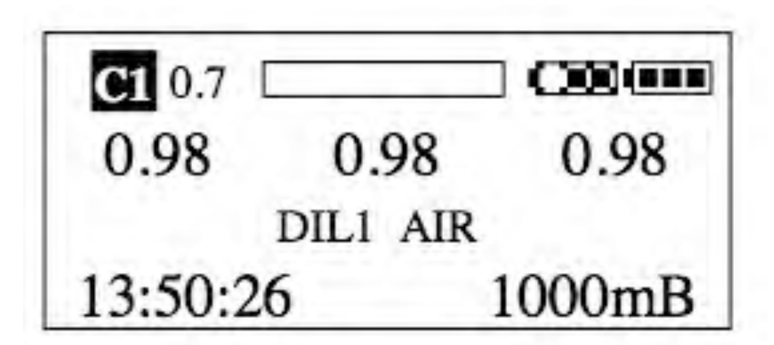
Comme nous l'avons vu précédemment, les sondes O2 ayant des tensions de sortie différentes pour une même PpO2 mesurée, il faut les étalonner avant chaque plongée. L'opération prend moins d'une minute mais l'élève contrôlera attentivement l'évolution de la tension de chaque sonde afin d'identifier celles qui ont un retard par rapport aux autres

lorsque la PpO2 augmente ou celles qui arrivent rapidement au plateau car ce peut être des signes avant-coureurs de cellules défectueuses. Là encore la parfaite connaissance de sa machine passe par une multitude de petites observations et de gestes que le débutant devra assimiler.

III.1.5 Réglages des paramètres de gestion de la PpO2 et de décompression

Une fois la machine prête, il faut ensuite vérifier que les paramètres définis pour la gestion automatique de la PpO2 et de la décompression sont adaptés à la plongée à venir. L'élève devra apprendre à vérifier ou à régler :

- Les valeurs des setpoints haut et bas
- Le mode de changement de setpoint. Dans le mode automatique, le plongeur doit fixer les profondeurs à partir desquelles la machine bascule du setpoint bas vers le haut et vice-versa. En mode manuel ce sera au plongeur d'effectuer la bascule de setpoint. Un oubli de passage en setpoint haut en profondeur pourrait avoir des conséquences fâcheuses en termes de rallongement du temps de décompression.
- Le diluant pris en compte pour le calcul de la décompression (air ou trimix)
- Les paramètres de décompression (niveau de conservatisme si la machine est nitrox uniquement ou réglage des Gradient Factors si la machine dispose de l'option décompression trimix)



Exemple d'affichage en mode surface après paramétrage : la console indique le contrôleur maître en haut à gauche (C1), le setpoint utilisé (0,7b), le niveau d'utilisation de la chaux et le niveau des deux piles. En milieu d'écran on observe la valeur de la mesure de la PpO2 pour chaque sonde (0,98b) ainsi que la nature du diluant. L'heure et la pression atmosphérique sont indiquées sur la ligne du bas.

III.1.6 Montée de la chaux en température

Une fois la machine prête, il faut commencer à ventiler sur la boucle au sec pour vérifier que l'électronique fonctionne correctement et qu'elle remonte la PpO2 rapidement au setpoint de surface, 0,7b. Il faut d'autre part ventiler quelques minutes pour que la réaction de captation du CO2 se lance et que la chaux soit opérationnelle immédiatement dès l'immersion. Pour les Inspirations possédant un **tempstick** (sondes de température disposées linéairement dans la chaux), on ventilera jusqu'à ce que le tempstick donne une indication de température. Durant cette phase il est conseillé de ne pas ventiler par le nez mais uniquement par la bouche sur la boucle de manière à pouvoir détecter toute sensation étrange qui pourrait être le signe d'un début d'hypercapnie avant de passer à l'eau.

III.2 Redevenir débutant : gérer un nouveau paradigme temps/profondeur/flottabilité

Il n'est pas rare de voir en CCR les plongeurs CO les plus expérimentés progresser moins rapidement que de jeunes P3. Si, bien évidemment, le plongeur confirmé en CO ne perd pas le bénéfice de sa connaissance de l'environnement subaquatique, bon nombre d'acquis en CO vont devoir être « désappris » pour pouvoir progresser en CCR. C'est parfois quelque peu déstabilisant pour des plongeurs extrêmement confirmés de devoir se retrouver en situation de débutant mais il est indispensable de ne pas griller les étapes. Au final, les plongeurs seront tout à fait capables de passer du CO au CCR sans aucun problème, comme on peut par exemple passer de la conduite d'une automobile à celle d'une moto, chacune ayant ses particularités.

III.2.1 L'équilibrage, perte du poumon ballast

L'exemple typique d'une difficulté pour un plongeur CO confirmé est la perte du poumon ballast. Le débutant aura toujours tendance à utiliser le poumon ballast mais s'apercevra rapidement que c'est inutile. Il faudra donc jouer plus souvent et plus finement du direct system pour arriver à s'équilibrer avec précision. Avec le temps les réflexes vont aussi se modifier pour par exemple contourner un petit obstacle sur le côté plutôt que de changer de niveau pour l'éviter. Une fois la stabilisation maîtrisée, le plongeur CCR appréciera la sensation de « glisser sur un rail » quel que soit le rythme ventilatoire. Le plongeur CCR parfaitement stabilisé ne connaîtra plus les micro-oscillations dues à la ventilation en CO et aura l'impression d'être comme suspendu à un fil en phase d'observation de la faune ou au palier.

III.2.2 La ventilation

Bon nombre de plongeurs confirmés sont perturbés lors de leur baptême CCR du fait de ne pas avoir été prévenus de la différence majeure de ventilation qu'entraîne l'utilisation d'un recycleur fermé : l'absence de détente des gaz et le fait de devoir soi-même mettre en mouvement le gaz dans la boucle imposent une ventilation continue, sans les phases classiques de micro-apnées inspiratoires après détente que l'on connaît en CO. La ventilation en CCR doit être beaucoup plus proche d'une ventilation de surface, sans jamais d'apnée inspiratoire ou ventilatoire et sans chercher la sensation de poumons pleins. La maîtrise de la ventilation en recycleur nécessite de nombreux exercices, notamment l'enseignement du « minimum loop volume » ou volume minimum qu'il faut garder dans les faux poumons pour ventiler correctement mais sans pour autant embarquer plus de gaz qu'il n'en faut. Les débutants en CCR doivent généralement se surplomber pour compenser une mauvaise gestion de la ventilation menant à un volume exagéré de gaz dans les faux poumons. Des faux poumons trop gonflés modifient la position dans l'eau, obligent à se surplomber et durcissent l'effort expiratoire. Le plongeur CCR apprend à être encore plus à l'écoute de sa ventilation et à la contrôler de manière fine même s'il n'y a pas de gestion du poumon ballast. Une modification de la ventilation sans effort particulier pourra par exemple être un signe annonciateur d'une hypercapnie, toujours grave en CCR.

III.2.3 Le vidage de masque

Il ne s'agit pas tant de réapprendre le vidage de masque que de gérer la perte de gaz dans la boucle qui en résulte : lorsque le plongeur souffle par le nez pour vider son masque, il n'est plus en circuit fermé et doit aussitôt réinjecter manuellement du diluant dans la boucle pour compenser le volume perdu lors du vidage de masque. Ce volume peut aussi être réinjecté automatiquement par l'ADV mais de manière moins précise. Sans réinjection de diluant, le plongeur en pleine eau va descendre et éprouver des difficultés à ventiler.

III.3 Gérer les risques

Un changement majeur pour le débutant en CCR est d'envisager et de réagir différemment aux risques inhérents aux incursions subaquatiques. Le plongeur CO est formé depuis le départ à vérifier régulièrement ses paramètres tels que profondeur, temps et pression restante. Si ces paramètres restent importants dans le cas de la plongée en CCR, ils ne sont plus primordiaux : l'autonomie n'est généralement plus un problème et la gestion à PpO_2 constante optimise la décompression. Le plongeur CCR va devoir avant tout vérifier l'intégrité de sa boucle et du mélange respiré, seuls garants de sa survie en immersion. Des

risques comme l'hyperoxie ou l'hypoxie vont être complètement nouveaux pour des plongeurs CO air.

III.3.1 Contrôler sa PpO2

Tous les manuels de fabricants de CCR commencent généralement par une phrase du type : « Connaissez votre PpO2 à chaque instant sinon vous êtes en danger de mort ». La phrase a le mérite d'être claire et de poser une des bases majeures de l'apprentissage. La première chose à contrôler est donc sa PpO2 de manière à s'assurer que l'on se situe dans une gamme de PpO2 convenable, n'entraînant ni risque d'hypoxie ni risque d'hyperoxie. Les eCCR sont des machines sophistiquées programmées pour maintenir un setpoint de manière extrêmement précise sans intervention humaine. Des alarmes sonores et visuelles sont programmées sur Inspiration dès que la PpO2 chute en-dessous de 0,4b ou atteint 1,6b. Il n'en demeure pas moins que le plongeur doit maintenir un niveau de vigilance élevé et doit contrôler régulièrement le fonctionnement de sa machine. Ceci doit s'effectuer en regardant sa console une fois par minute environ. Il faut plusieurs minutes pour que la PpO2 chute en dessous de 0,4b si le plongeur n'est pas en phase de remontée. Un plongeur vigilant aura donc largement le temps d'intervenir avant de risquer l'hypoxie même en cas de panne de l'électronique. Durant son apprentissage, le débutant en CCR apprendra à contrôler régulièrement sa PpO2 en toutes circonstances et notamment lors de la remontée puisque la PpO2 chute alors rapidement et que l'électronique doit injecter de l'O2 à intervalles très brefs.

III.3.2 Se contrôler

Le dicton qui dit qu'on plonge avant tout avec sa tête n'a jamais été aussi vrai qu'en CCR. Lors de sa formation chaque élève va devoir analyser différents scenarii de problèmes et réagir en conséquence. En règle générale on dispose toujours d'un peu de temps pour analyser un problème éventuel et y trouver la parade. La précipitation est toujours à proscrire et l'élève est moins évalué sur sa rapidité d'intervention que sur sa capacité à identifier et à régler le problème correctement.

III.3.3 Hypercapnie

Le plongeur CCR doit lui même mettre en mouvement le gaz qu'il ventile et s'opposer aux résistances inhérentes à la boucle : il doit fournir un effort ventilatoire de l'ordre de 2,5 Joules par litre soit environ deux fois plus important que celui requis par un détendeur. Ceci est un facteur favorisant de l'essoufflement.

L'hypercapnie est sans nul doute le problème le plus ardu du plongeur CCR car la machine ne mesure pas la PpCO2 mais seulement la PpO2. De nouvelles machines tentent la vulgarisation de capteurs de PpCO2 mais la forte humidité qui règne dans la boucle rend les mesures du CO2 dans le spectre infra rouge fort peu précises pour un prix encore exorbitant. Espérons que dans l'avenir ce type de matériel puisse devenir fiable à un coût abordable. Les sources d'hypercapnie peuvent être exogènes (propres à un dysfonctionnement ou une mauvaise préparation de la machine) ou endogènes (rétention de CO2 au niveau de l'embout ou au niveau pulmonaire).

L'hypercapnie peut provenir :

- De soupapes anti-retour défectueuses au niveau de la boucle. Leur fonctionnement est à contrôler avant chaque plongée

- D'un mauvais positionnement du joint d'étanchéité du canister, provoquant ainsi un bypass d'une partie du CO2 qui ne traverse plus la chaux.

- D'une chaux arrivée en fin de vie ou d'un problème de « tunnelage » de la chaux. Une chaux trop tassée forcera le positionnement des granules dans un certains sens ce qui peut provoquer à l'échelle moléculaire de micro-canaux diminuant le temps d'exposition du CO2 à la chaux. L'élève apprendra lors de sa formation à ne pas trop tasser la chaux dans le canister.

L'hypercapnie sous forte PpO2 peut survenir sans quasiment de signes précurseurs comme sueurs, nausées ou céphalées. Le plongeur devra donc être particulièrement vigilant à toute augmentation rapide de son rythme ventilatoire.

Dans tous les cas une hypercapnie en CCR n'est pas réversible ; un rinçage au diluant de la boucle permet de se donner un peu de temps pour réagir mais il faudra impérativement passer sur circuit ouvert. De nombreux témoignages de plongeurs CCR ayant été victimes d'une hypercapnie foudroyante font état d'une grande difficulté à réfléchir et à effectuer le moindre geste : sortir de la boucle pour prendre un détendeur de secours paraît alors quasi impossible. C'est pour pallier à ce genre de difficulté que les constructeurs de recycleurs ont travaillé à des embouts spéciaux incluant un deuxième étage de détendeur et capables d'être connectés à un bloc de diluant ou de réchappe : les B.O.V (*Bail Out Valves*). Un simple levier permet alors de passer de la boucle fermée en circuit ouvert sans changer d'embout.



Schéma de l'O.C.B (*Open Circuit Bailout*) vendu en option par A.P.Diving. Le couvercle et la membrane de ce BOV ont été enlevés laissant apparaître le mécanisme similaire à un deuxième étage de détendeur. Le levier sur la gauche se positionne en mode CC (Closed Circuit) durant la plongée et peut être basculé en mode OC (Open Circuit) par le plongeur en cas de nécessité. L'embout est alimenté par une entrée UNF 9/16'' classique (en bas à gauche).

Pour ma part je préconise vivement l'achat de l'option B.O.V aux débutants et/ou plongeurs appelés à plonger fréquemment en palanquées mixtes eCCR/CO. Le B.O.V présente l'énorme avantage de faciliter le passage du CCR au CO :

- En facilitant la manipulation et en la rendant plus rapide : un seul levier est à actionner en cas de problème. On évite ainsi les problèmes de fermeture de boucle et de prise de détendeur de secours avec ouverture du bloc de secours

- En évitant le risque de noyade si jamais le plongeur sort de la boucle sans réussir à prendre le détendeur de secours à temps.

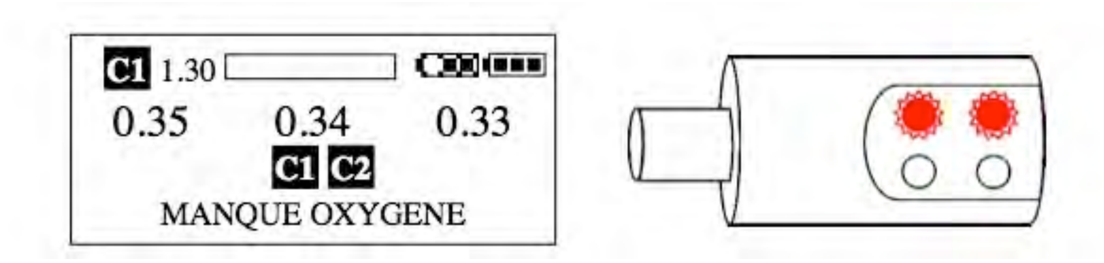
Le B.O.V permet de plus au plongeur CCR d'être sanglé à l'embout sans que cela ne pose le moindre problème puisque dans tous les cas il restera sur le même embout. En cas de perte de connaissance, la sangle permet de maintenir fermement l'embout en bouche du plongeur CCR en évitant l'entrée d'eau dans la boucle et les poumons. La sangle d'embout

est depuis longtemps obligatoire dans le domaine militaire mais a souvent été décriée en utilisation loisirs où elle est souvent vue comme un obstacle au passage sur détendeur de secours. L'association B.O.V plus sangle rend l'assistance d'un plongeur CCR inanimé beaucoup plus aisée : j'apprends systématiquement la manipulation du B.O.V aux plongeurs CO avec qui je plonge. En cas de problème, ils ont pour consigne de passer le B.O.V sur position CO et d'effectuer une assistance classique.

III.3.4 Hypoxie

Pour un eCCR, l'hypoxie peut venir d'un dysfonctionnement de l'électrovanne bloquée en position fermée, dû par exemple à un problème de corrosion interne. Il peut aussi arriver que le bloc d'O2 soit vide ou soit resté fermé. Il est arrivé par le passé que certains plongeurs se soient immergés sans avoir au préalable allumé l'électronique. L'électronique vision possède à présent un système de sécurité qui allume les contrôleurs en immersion et maintient une PpO2 de 0,4b en l'absence de toute intervention humaine.

L'hypoxie peut arriver subitement sans signe avant coureur en dessous de 0,16b de PpO2. Une alarme majeure visuelle et sonore s'enclenche sur l'électronique Vision dès que la PpO2 chute en-dessous de 0,4b. Dans tous les cas le plongeur doit contrôler régulièrement sa PpO2 et réguler manuellement l'injection d'O2 si jamais l'électrovanne est bloquée fermée. Sur un recycleur les robinets doivent toujours être à portée de main afin d'ouvrir ou de fermer les blocs au besoin. Un bloc d'O2 fermé sera identifié par un manomètre O2 à 0b et un contrôle du robinet. Un bloc vide ou une perte massive d'O2 impliquera le passage en circuit ouvert sur le bloc de réchappe si les coéquipiers ne peuvent fournir d'O2.



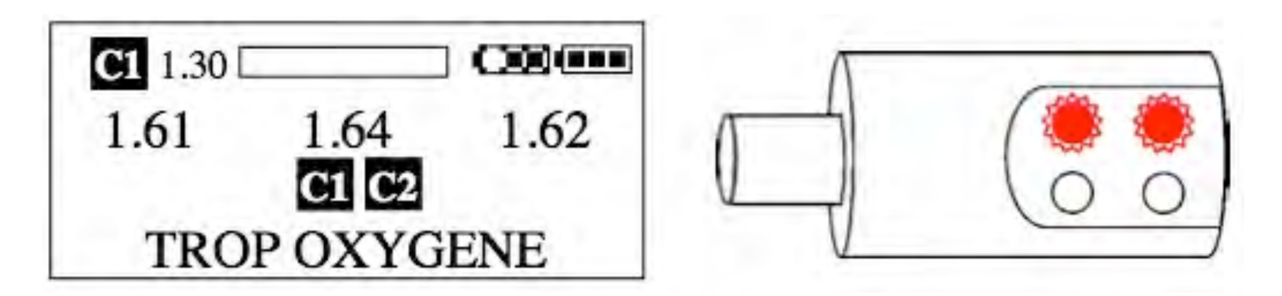
Messages visuels à destination du plongeur en cas de chute de la PpO2 : la console indique le problème tandis que le H.U.D clignote en rouge dans le champ de vision du plongeur. Le buzzer au niveau de l'oreille gauche du plongeur fait retentir un signal sonore.

Un plongeur recycleur trouvé inanimé devra être traité comme étant en hypoxie, le remonter immédiatement ne ferait que faire chuter la PpO2 et aggraver l'hypoxie. Le mieux est de prendre quelques secondes pour effectuer un rinçage au diluant de la boucle et de rétablir un niveau vital de PpO2. La sortie de la boucle d'un plongeur CCR inanimé pour lui faire

prendre un détendeur de secours est toujours débattue car le risque de noyade est alors non négligeable.

III.3.5 Hyperoxie

Une PpO2 trop élevée (>1,6b) peut quant à elle présenter un fort risque d'hyperoxie. L'Inspiration est pourvu d'une alarme majeure lorsque la PpO2 est mesurée comme supérieure à 1,6b. Une alerte lors de la descente correspond souvent à un passage prématuré sur setpoint haut : le plongeur continue de descendre alors que la PpO2 est passée à 1,3b. La PpO2 continue alors d'augmenter et le plongeur est rappelé à l'ordre par une alarme. Il suffit alors de stopper la descente et d'effectuer un rinçage au diluant pour rétablir la PpO2 à 1, 3b.



Messages visuels à destination du plongeur en cas de PpO2>1,6 : la console indique le problème tandis que le H.U.D clignote en rouge dans le champ de vision du plongeur. Le buzzer au niveau de l'oreille gauche du plongeur fait retentir un signal sonore.

Lorsque l'alarme d'hyperoxie se déclenche lors d'un déplacement horizontal le risque est alors plus important car il peut provenir d'une électrovanne bloquée en position ouverte lors de l'injection de l'O2. L'O2 entre alors de manière continue dans la boucle. Plus la pression ambiante est élevée et plus le risque est majeur. Le débutant apprend donc à fermer le robinet de son bloc d'O2 rapidement puis à effectuer un rinçage afin d'écarter le risque d'hyperoxie. Dans ce cas il pourra poursuivre sa plongée sur recycleur en réglant l'injection d'O2 manuellement par ouvertures et fermetures successives du bloc d'O2 de manière à maintenir la PpO2 au niveau du setpoint.

Quelques cas d'hyperoxie ont aussi été rapportés lorsqu'il y a eu erreur de gonflage du diluant : un diluant nitrox au lieu de l'air entrainera rapidement une alarme O2 qui ne pourra pas passer après rinçage au diluant. Le plongeur devra donc avoir la présence d'esprit de passer directement sur le bloc de réchappe.

Enfin des cellules O2 en fin de vie vont sous-estimer la valeur de la PpO2 car la tension délivrée en sortie de cellule ne sera plus proportionnelle à la valeur de la PpO2. Une PpO2

augmentant fortement peut alors passer inaperçue par l'électronique du recycleur qui n'alarmera pas le plongeur. Le débutant apprendra à contrôler régulièrement la réponse des cellules O2 lors des phases d'étalonnage, lors de paliers à 6m à l'oxygène pur et lors de rinçages au diluant. Les cellules O2 devront être changées tous les 12 à 18 mois au plus.

III.3.6 Hygiène

Une boucle de CCR étant par définition une enceinte close, chaude et humide elle constitue le lieu privilégié pour le développement de microorganismes dont certains peuvent être pathogènes. Il suffit de vider le contenu du faux poumon expiratoire à la fin d'une journée de plongée pour en voir couler un liquide visqueux parfois verdâtre. Le rinçage à grande eau des tuyaux annelés et des faux poumons est préconisé après chaque plongée. Au bout de quelques jours de plongée il est conseillé de les désinfecter à l'aide de produits de type Buddy Clean ou Virkon afin d'éviter tout risque de contamination pulmonaire. Il ne faut pas hésiter à laisser tremper les faux poumons une vingtaine de minutes pour que le traitement soit véritablement efficace.

III.3.7 Inondation de la boucle ou panne majeure d'électronique

Les cas de passage absolu sur bloc de réchappe sont rares. L'inondation totale de la boucle une fois les tests positifs et négatifs effectués est très peu probable. Par contre les débutants oublient souvent lors d'un lâcher/reprise d'embout de fermer l'embout du recycleur entraînant par la même des entrées d'eau dans la boucle. Les pièges à eau au niveau des faux poumons suffisent généralement à éviter le pire mais il est vrai qu'en cas de noyade complète de la boucle il n'y a pas d'autre alternative que le passage sur bloc de secours : le plongeur recycleur voit alors sa flottabilité devenir négative du fait de la perte d'une dizaine de litres de gaz remplacés par l'eau et le filtre devient inopérant. Au contact de l'eau la soude contenue dans la chaux va se dissoudre pour former le fameux « cocktail caustique » qui, s'il est respiré, attaquera les muqueuses du plongeur.

Un autre cas de force majeure nécessitant le passage en circuit ouvert est une panne totale d'électronique. Tant que la PpO2 est mesurée correctement le plongeur peut la contrôler manuellement. Mais si plus aucune mesure de PpO2 n'est disponible ou bien si le plongeur se rend compte que la valeur donnée est irréaliste, un rinçage au diluant n'apportera qu'un répit temporaire et la sortie de boucle deviendra indispensable.

III.3.8 Hypothermie

Même si le plongeur recycleur respire un mélange chaud, le risque d'hypothermie devient important du fait de l'allongement du temps de plongée. En dehors des eaux tropicales, des

plongées de plus de 2 heures nécessiteront l'utilisation d'une combinaison étanche. En Méditerranée, on supportera amplement un vêtement semi-sec pour des plongées de plus d'une heure. Lors de plongée au-delà de 40m, l'hélium contenu dans le diluant trimix contribuera à une plus grande déperdition calorifique et il faudra veiller à porter des sous-vêtements isothermiques en dessous du vêtement sec.

III.4 Anticiper et réagir face aux problèmes

III.4.1 Assistance en eCCR

L'assistance d'un plongeur en difficulté en eCCR est un exercice enseigné mais toujours approximatif. La première aide qu'un coéquipier apporte à un plongeur eCCR en difficulté est de faciliter le passage en CO, de vérifier l'adéquation des gaz respirés, d'aider à régler une fuite… Le coéquipier est plus là pour faciliter la résolution du problème que pour régler le problème. L'assistance avec remontée contrôlée demande la maîtrise d'au moins 4 volumes de gaz (2 gilets et 2 paires de faux poumons) voire de 6 si les plongeurs sont en vêtement sec. L'accent durant la formation est donc d'abord mis sur la prévention et l'utilisation de modes dégradés qui vont permettre au plongeur de regagner la surface par lui-même.

III.4.2 Modes de fonctionnement dégradés

Une machine telle que l'Inspiration Vision présente une multitude d'utilisations en modes dégradés qui permettent à un plongeur correctement formé de n'envisager le passage sur circuit ouvert qu'en ultime recours. Au fur et à mesure que le plongeur va maîtriser sa machine, il va devenir de plus en plus réticent à sortir de la boucle car il va alors être confronté à un problème majeur d'autonomie et de décompression.

Un problème de perte d'injection automatique d'O2 ou de débit continu peut être réglé manuellement. Une perte de diluant n'est pas critique dans la mesure où l'on ne descend pas : à la remontée les volumes des gaz augmentent et il n'y a pas besoin d'adjonction de diluant.

Le cas d'une fuite d'O2 est beaucoup plus inquiétant car il est indispensable de maintenir la PpO2 lors de la remontée. On pourra dans ce cas précis essayer de brancher l'arrivée manuelle d'O2 d'un coéquipier sur son propre faux poumon expiratoire, ce qui permettra d'injecter de l'O2 manuellement.

L'Inspiration possède un système sophistiqué de contrôle de la tension des piles et d'alimentation des deux contrôleurs redondants. Les piles sont contrôlées à chaque

allumage et la machine ne peut passer en mode plongée si des piles sont à changer. En cas de problème d'alimentation majeur, l'électronique est capable de couper des circuits non vitaux et l'affichage pour maintenir suffisamment de courant pour alimenter l'électrovanne.

Même en l'absence de toute électronique le plongeur peut remonter en mode semi-fermé tant que le filtre de chaux est opérationnel : il s'agit alors d'effectuer 3 cycles ventilatoires puis d'expirer par le nez en dehors de la boucle tout le gaz avant d'injecter dans la boucle du diluant et de recommencer les 3 cycles.

En ce qui concerne la décompression, un eCCR du type Inspiration est capable de recalculer automatiquement la décompression en cas de passage inopiné sur circuit ouvert.

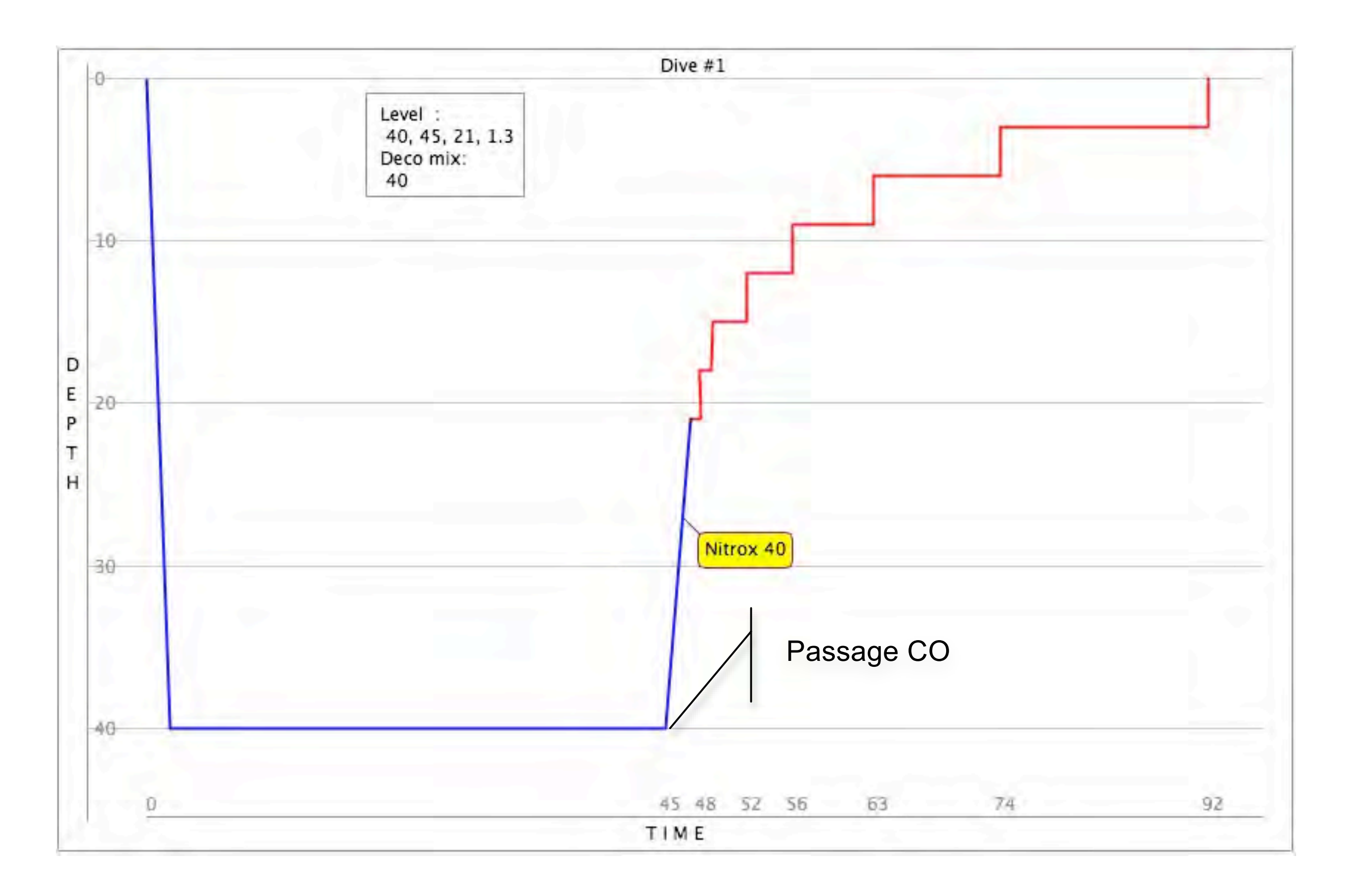
L'enseignement de tous ces scenarii d'urgence est fondamental mais la pratique régulière des exercices l'est plus encore. Un plongeur eCCR doit plonger régulièrement avec sa machine et répéter différents exercices s'il veut pouvoir faire face en sécurité à des situations inattendues.

III.4.3 Stratégies de redondance et de réchappe

Parmi les discussions les plus acharnées dans le domaine de la plongée en CCR, les stratégies de réchappe (*bail out* en anglais) arrivent probablement en tête de peloton. La question essentielle est de calculer le volume de gaz à emporter en circuit ouvert afin d'assurer la sécurité du plongeur en cas de sortie de boucle. Il n'existe pas de règle absolue et chaque palanquée CCR devra discuter de la question pour trouver un accord.

Il est généralement admis que les blocs de réchappe emportés doivent permettre de secourir un plongeur en difficulté lors de la dernière minute de plongée, c'est-à-dire de lui permettre d'effectuer sa remontée et ses paliers.

Une rapide simulation sur le logiciel V-planner nous permet de montrer que dans le cas d'une plongée de 45 minutes à 40m au diluant air, un bloc de 7 litres de N40 gonflé à 200b permet d'assurer la remontée en cas de problème.



Dans la courbe ci-dessus, le plongeur recycleur est sur diluant air à PpO2 =1,3b. Au bout de 45 min de plongée un incident l'oblige à passer sur sa réchappe de N40. Avec une consommation de 20 l/min, il lui faudra environ 1350l de N40 pour assurer les 44min de remontée. On considèrera que de 40 à 30m le plongeur peut respirer sur son diluant avant de prendre le N40 à 30m.

De manière générale, un gaz de réchappe ne constitue pas un bon diluant et vice-versa car les impératifs sont différents. Un gaz de réchappe doit raccourcir au mieux la décompression en CO car il est pris en cas de force majeure. Il doit donc fournir une fraction oxygène la plus élevée possible. Un gaz de diluant par contre doit permettre d'effectuer des rinçages efficaces en profondeur si jamais la PpO2 augmente rapidement. Il doit donc être relativement pauvre en O2 (la fraction d'O2 doit être calculée pour fournir au maximum une PpO2 de 1b au fond), la majorité de l'O2 dans la boucle provenant de l'injection à partir du bloc O2 pur. On utilisera donc en gaz de réchappe des nitrox riches en O2… mais pas trop pour pouvoir les prendre suffisamment profond.

Dans le cas de plongées en diluant air, un bloc de 7l de N40 constitue donc un bon compromis de réchappe. On pourra de plus compter sur des stratégies de « team bail out » : 3 plongeurs emportent suffisamment de réchappe pour potentiellement 2 plongeurs en difficulté, ou 2 plongeurs calculent leur réchappe pour un passage en CO pour l'un des deux.

III.5 La nécessité du trimix au-delà de 40m

Les constructeurs de CCR préconisent l'utilisation de trimix en diluant dès 40m. La raison est double :

- Comme vu précédemment, l'effort ventilatoire est supérieur en CCR et l'essoufflement est un risque majeur. Au delà de 40m, la densité de l'air ne permet plus à un plongeur CCR d'effectuer un effort important. L'ajout d'hélium va diminuer la viscosité et la densité du mélange et fournir un meilleur confort et une plus grande sécurité.

- La pratique du CCR est incompatible avec la moindre narcose : le plongeur doit pouvoir à tout moment analyser des situations complexes. Il est donc conseillé de ne pas dépasser des équivalents narcotiques de 30m lors de plongées en CCR.

Fort heureusement la nature même des CCR rend l'utilisation de l'hélium peu onéreuse : environ 50b de trimix d'un bloc de 2-3l seront consommés par plongée.

La nature même du CCR, ses capacités d'autonomie et d'exploration en plongée profonde font que bon nombre de plongeurs souhaitent tôt ou tard pouvoir se former au trimix élémentaire. Un recycleur fonctionne de la même manière avec un diluant air ou un diluant trimix. Seules l'organisation et les procédures de décompression changeront véritablement.

IV. Organiser la pratique

IV.1 Voyages et transports

IV.1.1 Infrastructures d'accueil

Une des premières contraintes pour le plongeur recycleur est de pouvoir voyager avec la machine dans laquelle il a investi. A moins de voyager uniquement en voiture, la première difficulté va être de pouvoir trouver à destination les consommables dont il a besoin. En France, il devient relativement aisé de se fournir en chaux et oxygène sur la côte méditerranéenne sud-est. Pour les côtes sud-ouest et la Bretagne, le ravitaillement peut être plus problématique. Il faudra donc planifier l'organisation à l'avance et vérifier les services disponibles auprès des centres de plongée.

Au niveau international, la plus grande partie des lieux reconnus pour la plongée disposent à présent d'au moins quelques centres pouvant facilement accueillir des plongeurs recycleurs. Les croisières « rebreather friendly » se multiplient pour peu qu'on accepte d'être dans un environnement anglo-saxon. Que ce soit aux Maldives, en mer Rouge, aux Caraïbes ou en Polynésie, on peut trouver sur place oxygène, chaux et parfois même blocs de 2 ou 3 litres. Des annuaires existent (comme sur www.rebreatherworld.com) recensant les clubs acceptant les recycleurs et ayant des services adaptés. Idéalement le plongeur recycleur doit pouvoir trouver à destination :

- De la chaux adaptée à son recycleur (Sofnolime 797 pour l'Inspiration)
- De l'oxygène pur avec station de gonflage adaptée (B50 en série ou surpresseur O2)
- Des sondes oxygène de remplacement
- Des blocs de 5 à 9l en aluminium comme blocs de réchappe
- Des piles et petites pièces de rechange

Trouver l'intégralité de la liste ci-dessus relève encore de la gageure aussi les plongeurs CCR voyagent-ils souvent avec une petite trousse à outils et du matériel de réparation ainsi que des petits consommables (piles, sondes O2) souvent spécifiques à leur machine. Dans quelques rares sites, on peut trouver à louer sur place des machines type Inspiration mais le surcoût engendré n'est pas forcément favorable au plongeur.

IV.1.2 Moyens de transport

En fonction des modèles, un eCCR pèse de 20 à 35kg. Chez A.P. Diving, un recycleur de type Evolution+ pèse 22kg sans la chaux tandis que l'Inspiration pèse 27kg. En transport aérien, il est conseillé de placer l'électronique en bagage cabine, ce qui laisse 20-25kg de bagages supplémentaires en soute. En période de hausse du coût des bagages, le surcoût devient non négligeable si l'on ne peut bénéficier d'un forfait transport de matériel de sport. Le gabarit de la machine sera aussi à prendre en compte : certains recycleurs vont pouvoir entrer dans de grosses valises classiques tandis que les plus volumineux vont devoir voyager dans leur caisse d'origine en tant que bagage hors gabarit. Les plongeurs voyageant en avion avec leurs blocs de diluant et d'O2 devront veiller à dissocier les robinets de conservation des blocs sous peine de se faire bloquer par les organismes de sécurité aérienne ou les douanes.

En ce qui concerne les voyages en train, les eCCR compacts pourront tenir place dans un sac à roulette et être placés dans les compartiments bagages d'un TGV sans problème tandis que l'opération sera plus délicate pour des recycleurs de la taille de l'Inspiration. Ces critères seront aussi à prendre en compte lors du choix d'une machine. Un modèle comme l'Evolution+ présente un bon compromis entre performances, poids et encombrement pour les plongeurs souhaitant effectuer un cursus fédéral.

IV.2 Organisation des plongées en club

Plonger en eCCR nécessite aussi de prévoir un minimum d'organisation logistique au sein des clubs d'accueil, tant au niveau du stockage des machines que de l'organisation des sorties et des palanquées.

IV.2.1 Locaux

Idéalement, les clubs accueillant des recycleurs doivent pouvoir fournir des locaux suffisamment sécurisés pour que les propriétaires des machines puissent les laisser sur place après la plongée plutôt que devoir les transporter sans cesse. Un local séparé des autres plongeurs permet de stocker les machines et de pouvoir effectuer au calme les étapes de préparation avant de monter sur le bateau. Si les locaux sont situés loin du bateau, une solution doit être trouvée pour que les recycleurs soient acheminés sans souci jusqu'au quai d'embarquement.

La station de gonflage devra quant à elle pouvoir fournir de l'O2 pur et si possible de l'hélium pour le trimix ainsi que des analyseurs pour contrôler les mélanges. Les blocs diluant et O2 devront être clairement différenciés de manière à éviter toute confusion.

IV.2.2 Embarcations

Les eCCR ne sont pas des matériels particulièrement fragiles mais on évitera tout de même les secousses intempestives. Même si l'utilisation de semi-rigides est tout-à-fait envisageable, bon nombre de plongeurs CCR préfèreront un bateau rigide où les machines peuvent être solidement arrimées et présentant un minimum de place pour se préparer. Un recycleur ne prend pas à bord plus de place qu'un bi, mais plus qu'un 12l ou qu'un 15l. On veillera à pouvoir garder à portée de main le ou les blocs de réchappe.

A bord, le code du sport indique que le Directeur de Plongée devra posséder la qualification du mélange utilisé par les plongeurs recycleurs : nitrox pour les recycleurs au diluant air et trimix pour les recycleurs avec un diluant trimix. C'est par ailleurs à lui à vérifier la conformité des machines : une plaque CE est apposée sur les modèles certifiés. Le pilote ou la personne en charge de la sécurité sera toujours au début un peu anxieux du fait de l'absence de bulle. Les palanquées de recycleurs auront donc soin de fournir aux personnes restant en surface une idée de leur parcours et de leurs paramètres, voire un plan (run-time) précis de leur plongée en ce qui concerne les plongées trimix.

IV.2.3 Plonger en palanquées

Pour les plongeurs recycleurs, l'idéal est de pouvoir plonger entre recycleurs de manière à pouvoir profiter pleinement des avantages inhérents à leur machine : silence, autonomie… Dans le cas de longues plongées entre recycleurs, les plongeurs apporteront un soin tout particulier à leur orientation sinon ils risqueront de s'éloigner fort loin de leur embarcation sans que la personne en sécurité surface ne puisse s'en apercevoir. Un topo détaillé avant la plongée sera donc nécessaire ainsi que l'utilisation de compas ou de balises électroniques de type pinger.

Lorsque les plongeurs recycleurs seront sur un même bateau que des plongeurs CO, le directeur de plongée devra préciser très clairement un temps maximum de plongée sous peine de devoir attendre encore un long moment les palanquées recycleurs une fois les palanquées CO revenues. Des temps de 60 à 90 minutes selon les cas semblent un bon compromis en général.

Les palanquées mixtes (plongeurs CCR et CO) demandent aussi une attention toute particulière : sans entrer forcément dans une foule de détails, les plongeurs CCR devront expliquer impérativement à leur coéquipiers CO :

- Comment venir chercher de l'air (ou du nitrox) sur leur bloc de réchappe en cas de besoin

- Qu’il faut leur signaler tout échappement continu de bulles, l’expulsion de bulles à la remontée étant un phénomène normal

- Comment réagir en cas de problème majeur ou perte de connaissance : passage sur CO ou rinçage de boucle, position des purges pour une remontée assistée… L’assistance d’un plongeur eCCR ne pose généralement pas de problème particulier car sa machine régule la PpO2. Celle d’un plongeur mCCR est beaucoup plus délicate car l’injection d’O2 à la remontée est forcément manuelle. En règle générale, l’utilisation d’un BOV est fortement recommandé pour les palanquées mixtes car ils simplifient énormément la réaction demandée au plongeur CO qui se sent ainsi rassuré : il suffit de basculer le levier du BOV pour que l’assisté passe en CO et que l’on puisse effectuer un assistance relativement classique.

Le DP devra donc veiller à ce que chaque type de plongeur ait bien l’information dont il a besoin avant la plongée.

Dans le cas des palanquées mixtes en enseignement, la CTN s’est prononcée sur l’interdiction de l’utilisation des recycleurs en examen de plongeurs CO. En situation d’apprentissage, il est tout à fait possible à un moniteur en CCR d’enseigner à un plongeur CO si les exercices prévus ne nécessitent pas d’assistance sur le moniteur : on pourra par exemple utiliser un CCR si l’on enseigne l’orientation ou l’autonomie à un plongeur préparant le niveau 2 ou le niveau 3. L’utilisation d’un CCR est par contre à prohiber sur des exercices d’interprétation de signes ou d’assistance d’un plongeur en difficulté.

L’utilisation d’un CCR est particulièrement délicate entre 0 et 10m où le fort gradient de pression et les fortes variations de volumes vont obliger à plus d’attention et de maîtrise du niveau d’immersion. On évitera donc de confier l’encadrement de débutants à des guides de palanquée ou des moniteurs en CCR sans beaucoup d’expérience sur la machine. Leurs capacités de réaction en cas de problèmes s’en trouveraient fortement diminuées. Cela est par contre tout à fait envisageable pour des plongeurs CCR confirmés.

V. Conclusion

L'offre eCCR évolue constamment et on voit de plus en plus le marché se tourner vers le grand public avec des machines élaborées pour plonger dans la courbe de sécurité à PpO2 constante dès l'open water ou l'advanced open water selon le positionnement même de PADI. En France, ceci va sans doute prochainement poser un problème réglementaire puisque le code du sport impose un niveau 3 et une certification nitrox confirmé pour pouvoir entrer en formation CCR. Mais en dehors de critères purement réglementaires, le succès d'une telle approche marketing dépendra sûrement du niveau de fiabilité des machines. Si la fiabilité est au rendez-vous, on pourra penser qu'une population de plongeurs vieillissants, à fort pouvoir d'achat se laissera tenter. Si par contre l'automatisation quasi-totale des eCCR s'accompagne d'un nombre de dysfonctionnements importants ne pouvant pas être gérés par le niveau de formation très élémentaire des plongeurs, alors le marché du eCCR restera encore longtemps cantonné à un public de passionnés, plongeurs expérimentés désireux de repousser les capacités d'explorations de la plongée traditionnelle.

Comme nous l'avons vu, la plongée en eCCR requiert pour l'instant un bon niveau de technicité et une remise en question importante des plongeurs en circuit ouvert désireux de franchir le pas. Si les avantages en terme de découverte du milieu sont indéniables, le plongeur aura à réfléchir sérieusement à ses objectifs personnels (explorations profondes, photo ou vidéo, coûts…) et à accepter une formation exigeante. Au delà de la formation initiale, le plongeur eCCR devra s'obliger à une pratique régulière afin de ne pas perdre ses acquis et de pouvoir maintenir un bon niveau d'efficacité en cas de problème. Ceci sera amplement facilité s'il réussit à rejoindre une communauté de plongeurs eCCR qui pourra l'aider à continuer à progresser et lui fournir un cadre convivial de pratique de son activité.

Au niveau fédéral, il nous faudra donc rester très attentifs aux évolutions technologiques et travailler à toujours mieux adapter nos cursus de formations aux nouveaux matériels et aux nouveaux besoins sous peine de voir une proportion de plongeurs quitter le giron fédéral pour rejoindre des systèmes purement commerciaux. Aux efforts de nombreux pionniers pour faire découvrir et structurer cette nouvelle activité doivent à présent succéder une volonté de formation de cadres et de travail sur la pédagogie pour mieux accompagner le développement de la plongée en recycleur fermé électronique et faire en sorte que notre expérience dans le circuit ouvert puisse être transposée à des plongées sans bulle en toute sécurité. C'est dans cet esprit que j'ai effectué mon travail de recherche sur la création de groupes de compétences propres au eCCR pour la formation trimix élémentaire fédérale (cf. annexe VI.3) qui peut constituer une proposition pour un groupe de travail.

VI. Annexes

VI.1 Glossaire

ADV : Automatic Diluent Valve. Mécanisme proche d'un deuxième étage de détendeur qui permet d'injecter du diluant dans la boucle lorsqu'elle se trouve en situation de dépression. Ce dispositif évite au plongeur d'injecter manuellement du diluant lors des phases de descentes pour maintenir la boucle à pression ambiante.

Bail Out : bloc de réchappe ou de secours. En recycleur les blocs supplémentaires emportés ne sont utilisés qu'en cas de dysfonctionnement majeur du recycleur.

BOV : Bail-out Valve. Embout de recycleur avec adjonction d'un système ouvert de type deuxième étage de détendeur de manière à passer en circuit ouvert en cas de besoin sans quitter l'embout du recycleur. Le BOV peut être soit connecté au bloc de diluant (connexion *in-board*), soit au bloc de réchappe (connexion *off-board*). Il est aussi dénommé OCB (Open Circuit Bailout) chez A.P. Diving.

CCR : Closed Circuit Rebreather. Recycleur fermé. On distingue habituellement 3 catégories de recycleurs fermés

mCCR : manual Closed Circuit Rebreather. Recycleur fermé manuel. L'injection d'O2 se fait en continu grâce à une buse sonique. Le complément doit être injecté au besoin manuellement par le plongeur.

eCCR : electronic Closed Circuit Rebreather. L'injection d'O2 est gérée électroniquement par le contrôleur électronique du recycleur.

hCCR : hybrid Closed Circuit Rebreather. Recycleurs hybrides composés d'une buse sonique pour l'injection d'O2 et d'un contrôleur électronique assurant le complément au besoin ou en dessous de certains seuils.

CO : Circuit Ouvert (Open Circuit en anglais). Désigne la plongée bouteille classique.

HUD: Head Up Display. Système d'affichage tête haute donnant des indications sur l'état de fonctionnement du recycleur (PpO2, injection, décompression…) à l'aide de LEDs rouges et vertes, fixes ou clignotantes.

OCB: Open-Circuit Bail-out. Voir BOV

RCF: Recycleur Fermé (voir CCR)

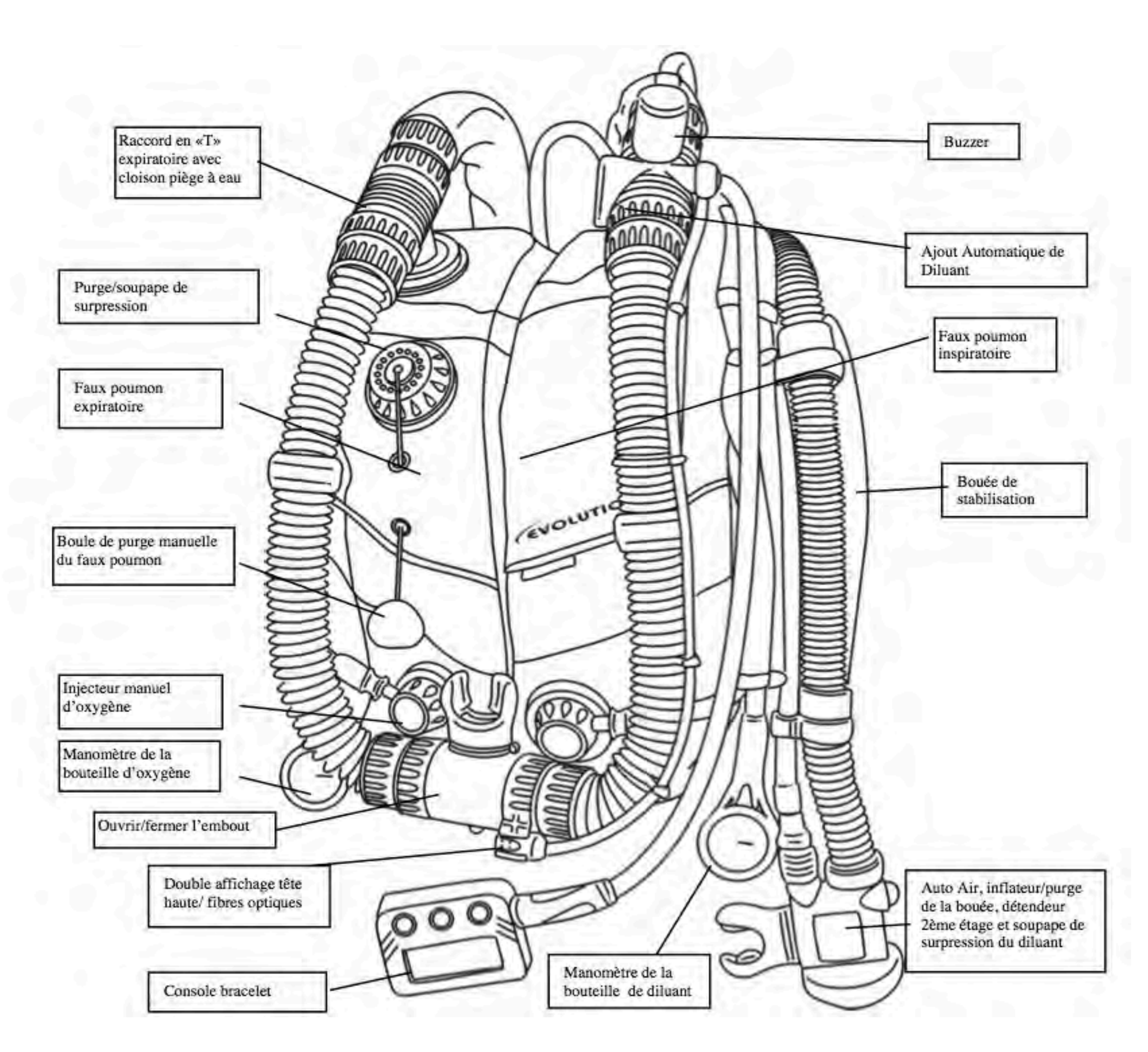
RSF : Recycleur Semi Fermé (voir SCR)

SCR : Semi-closed Circuit Rebreather. Recycleur semi-fermé

Tempstick : élément optionnel des recycleurs A.P.D constitué d'une suite de sondes thermiques disposées au sein du canister de manière à suivre l'évolution en température de la chaux. Seule la chaux active fonctionne. La chaux ayant atteint sa capacité maximale d'absorption de CO2 devient inactive et se refroidit. Le tempstick permet d'observer le front d'évolution de la chaux et de mesurer la quantité de chaux qui continue à capter le CO2.

VI.2 Schémas et données du constructeur A.P. Diving

VI.2.1 Anatomie d'un eCCR Inspiraton ou Evolution



VI.2.2 Liste des causes possibles menant à l'hyperoxie ou l'hypoxie en eCCR

Phase de la plongée	Opération normale du solénoïde	Risque du à l'oxygène	Causes possibles	Conclusion
Respiration en surface	fermeture 3 s ouvert lorsque la PpO_2 est à plus de 0.1 bar en dessous du setpoint. ouverture < 1 s quand la PpO_2 est proche et en dessous du Setpoint	Hypoxie : risque élevé Hyperoxie : AUCUN risque	Hypoxie : • robinet de la bouteille d'oxygène fermé • bouteille d'oxygène vide • solénoïde bloqué fermé • contrôleurs d'oxygène éteint	Avant la descente, il n'y a qu'un seul risque - l'hypoxie ou une pression d'oxygène trop faible. L'hypoxie peut survenir en moins d'une minute lorsqu'on est en surface. Surveillez fréquemment l'affichage de la PpO_2. Ecoutez l'injection d'oxygène
Mise à l'eau	fermeture 3 s ouverture < 1 s quand la PpO_2 est proche et en dessous du Setpoint			
En surface	fermeture 3 s ouverture < 1 s quand la PpO_2 est proche et en dessous du Setpoint			
La descente	Fermé. Ouvert lorsqu'on passe sur le setpoint haut. Les LED vertes du HUD clignotent jusqu'à ce que la PpO_2 soit à 0.2 bar du setpoint.	Hypoxie : AUCUN risque Hyperoxie : risque FAIBLE	Hypoxie : aucun risque, à condition que la teneur en oxygène du diluant convienne en surface Hyperoxie : addition manuelle d'oxygène ou solénoïde bloqué ouvert	Pendant la descente, le principal risque provient du diluant. La bouteille de diluant est-elle ouverte ? Vérifiez avant d'aller dans l'eau. Injectez-vous du diluant ou de l'oxygène ? Le diluant est à gauche (lean = left - rich=right) Ecoutez le solénoïde, il ne devrait pas s'ouvrir. S'il s'ouvre, vérifiez l'affichage des PpO_2
Evolution au fond	fermeture 3 s ouverture < 1 s quand la PpO_2 est proche et en dessous du Setpoint	Hypoxie : risque FAIBLE Hyperoxie : risque IMPORTANT	Hypoxie : • robinet de la bouteille d'oxygène fermé • bouteille d'oxygène vide • solénoïde bloqué fermé • contrôleurs d'oxygène éteints Hyperoxie : • ajout manuel d'oxygène • solénoïde bloqué ouvert	L'hypoxie est un risque faible uniquement parce qu'il faut un certain temps avant qu'elle ne survienne et que vous avez dû regarder l'affichage de la PpO_2 pour vous assurer qu'elle était proche du Setpoint Haut et ainsi vérifier que vous n'aurez pas d'accident de décompression. Ecoutez le solénoïde, vous devez entendre une courte injection suivie d'une période de silence de 6s. Si l'injection devait durer plus d'une fraction de seconde, vérifiez l'affichage de la PpO_2
La remontée	fermeture 3 s ouverture > 1 s si la PpO_2 chute de plus de 0.1 bar au dessous du setpoint, le solénoïde s'ouvre et reste ouvert jusqu'à ce que la valeur revienne à 0.1 bar du setpoint.	Hypoxie : risque IMPORTANT Hyperoxie : risque MOYEN		Hypoxie : la remontée est la partie la plus dangereuse. Vérifiez votre PpO_2 AVANT la remontée et encore plus souvent pendant. Ecoutez le solénoïde. Vous devriez entendre de longues injections. La durée d'injection variera en fonction de votre vitesse de remontée. Elle sera ouverte pendant environ 4-5 s puis fermée 6 s. Cela peut aller jusqu'à 17 s d'ouverture pour 6 s de fermeture. Hyperoxie : le risque d'hyperoxie diminue avec la remontée.
Paliers de décompression	fermeture 3 s ouverture < 1 s quand la PpO_2 est proche et en dessous du Setpoint	Hypoxie : risque FAIBLE Hyperoxie : risque MOYEN		L'hypoxie est un risque faible uniquement parce qu'il faut un certain temps avant qu'elle ne survienne et que vous avez dû regarder l'affichage de la ppO_2 pour vous assurer qu'elle était proche du Setpoint Haut et ainsi vérifier que vous n'aurez pas d'accident de décompression. Le risque de toxicité de l'oxygène augmente avec la durée des paliers. Assurez-vous de rester en deçà des limites de CNS établies par la NOAA
Nage en surface	fermeture 3 s ouverture < 1 s quand la PpO_2 est proche et en dessous du Setpoint	Hypoxie : risque IMPORTANT Hyperoxie : AUCUN risque	Hypoxie : • robinet de la bouteille d'oxygène fermé • bouteille d'oxygène vide • solénoïde bloqué fermé • contrôleurs d'oxygène éteint	L'hypoxie peut survenir en moins d'une minute lorsqu'on est en surface. Vérifiez fréquemment l'affichage de la PpO_2. Ecoutez l'injection d'oxygène

VI.3 Proposition de formalisation de cursus eCCR trimix élémentaire

On trouvera dans le tableau ci-dessous le pré-requis du cursus CCR Air en première colonne par groupe de compétence. En deuxième colonne les apports provenant du cursus trimix élémentaire CO. En troisième colonne on trouvera tous les éléments supplémentaires indispensables à acquérir en plus afin que le plongeur soit correctement formé à l'utilisation du trimix normoxique en eCCR.

Groupe de compétences 1 : connaissances théoriques communes		
eCCR Air (acquis)	**Trimix élémentaire CO (compétence 6)**	**Compléments nécessaires eCCR trimix élémentaire**
Histoire et évolution des recycleurs		
Principes généraux du fonctionnement d'un recycleur circuit fermé à gestion électronique : - Différences avec la plongée en circuit ouvert, les différents types de recycleurs (circuits semi fermés et fermés), - Compréhension des risques inhérents aux faibles volumes de gaz disponibles, - Difficultés de la surveillance en surface	Rappels et compléments de physique appliquée à la plongée Trimix (Dalton)	**Choix d'une Profondeur Equivalente Narcotique plus faible** **Choix gaz diluant (nécessité de garder la possibilité de faire tomber rapidement la PpO2 lors de rinçages)** **Choix gaz de réchappe (maximiser la décompression en CO en cas de nécessité)**
La respiration en recycleur (travail respiratoire, variations des volumes pendant la plongée, …), - Métabolisme du plongeur (oxygène, dioxyde de carbone), - Toxicité des gaz.	Différence entre la plongée à l'air, la plongée Nitrox et la plongée Trimix	
Prévention et traitement des accidents: hyperoxie, hypoxie, hypercanie, inondation du circuit, inhalation de poussières de chaux, risques infectieux.	Compléments d'information sur les accidents biochimiques. Le froid en plongée trimix.	**Rappels et compléments sur la prévention des accidents biochimiques propres au eCCR**

Procédures de décompression	Utilisation des tables trimix Planification de la plongée Planification de la décompression Logiciels de décompression et des ordinateurs de plongée gérant les mélanges Trimix	**Applications sur l'électronique Vision (choix des Gradients Factors…)** **Différences entre les modes CO / CCR** **Choix volumes de réchappe**
	Compétence 1: Planification de la plongée en fonction de l'autonomie et préparation des tables immergeables.	**Stratégies de réchappe et limites sur l'autonomie**
	La plongée profonde : dangers et règles de sécurité. Le matériel spécifique.	**Perte de gaz**
	Rappel du fonctionnement des analyseurs d'oxygène et d'hélium	
Réglementation .Prérogatives.	Réglementation (code du sport mélanges)	
Groupe de compétences 2 : Gérer et utiliser son matériel		
Identifier les pièces constitutives du recycleur utilisé.	Identification du matériel	
Monter et démonter l'appareil.	Utilisation maîtrisée de l'analyseur d'oxygène et d'He	
Assurer l'entretien courant du recycleur utilisé.	Connaissance et entretien du matériel	**Matériel complémentaire : formation sur les BOVs et les connecteurs nécessaires**

Spécificités, gestion et fonctionnement du circuit fermé électronique.		**Manipulations du menu décompression trimix** **Stratégies de diluant in board ou off board**
Contrôler et vérifier le recycleur utilisé.		
Traçabilité, hygiène et prévention		
	Informations sur le remplissage des bouteilles	**Informations sur le choix et l'utilisation des boosters O2.**
Adapter son équipement à l'utilisation du recycleur	Compétence 2 : Choix du lestage adapté en fonction de la bouteille supplémentaire de décompression équipant le plongeur. Préparation du matériel spécifique et identification, y compris les bouteilles nitrox, d'oxygène et leurs détendeurs spécifiques . Connaissance du positionnement du matériel sur soi et le coéquipier.	**Détermination de la configuration la plus adaptée pour la plongée trimix :** **- Cas des vêtements secs** **- Statégies de diluants in-board ou off-board** **- Stratégies de redondance et de réchappe**
	Préparation et mise en place des lignes de vie et de décompression.	
Groupe de compétences 3 : Plonger en eCCR		
Planifier sa plongée	Planifier sa plongée	**Différences planification OC/CCR. Choix de la réchappe (gaz et quantités)**

Vérifications, contrôles et comportement en surface avant la plongée.		**Rajout du contrôle du diluant, des réchappes et des Gradient Factors utilisés pour la décompression**
Techniques d'immersion		
Contrôles des fuites en début de plongée.		
Maîtrise de la stabilisation.	Adapter sa propulsion Maîtrise du lestage Maîtrise de la stabilisation, de l'équilibre à l'aide d'un gilet et ou d'un parachute.	**Perfectionnement de la stabilisation avec deux blocs de réchappe**
Vérification de la valeur de la PpO2 programmée (SetPoint).		**Information sur des PpO2 fond inférieures à 1,3b pour limiter l'exposition à l'O2**
Lâcher et reprise d'embout.		
Vidage de masque		
Evacuation de l'eau dans le circuit		
Passage sur embout de secours	Savoir changer de mélange sur la bouteille de décompression	**Passage sur réchappe au fond et remontée.** **Autoair proscrit si diluant hypoxique**
Gestion des incidents : - panne de diluant,	Conduire une analyse de risque avant la plongée Gestion du risque lié au manque	**Perfectionnement des techniques de base :** **Maîtrise rapide de la situation**

- panne d'oxygène, - fuites (internes/externes), - augmentation de la PpO2, - chute de la PpO2, - alerte cellule O2, - alerte pile, - dysfonctionnement A.D.V., - augmentation ou perte de la flottabilité, - entrée d'eau/inondation de la chaux sodée, - panne de(s) ordinateur(s), - panne du solénoïde.	de mélange: - Réaction à la panne de mélange - Utilisation du second détendeur.	**Insister sur les critères d'évaluation** **Nouvelles techniques au besoin: SCR, boucle ouverte**
Vitesse de remontée. Tenue des paliers	Respect du profil de plongée choisi. Utilisation correcte du parachute et de son dévidoir	**En mode normal et en mode remontée sur bloc de réchappe**
Groupe de compétences 4 : module spécifique Inspiration Vision		
Fonctionnement		**Connaissance approfondie de l'électronique Vision : mode simulation trimix**
Eléments constitutifs		**Impacts des changements de connectique éventuels**
Capacités en gaz et chaux sodée		**Capacité de la chaux variable selon la profondeur**

Paramétrage de l'électronique. Maintenance, stockage		**Définition des Gradient Factors** **Déclaration des mélanges de secours** **Passage CO-CCR**

La proposition de groupes de compétences pour la formation fédérale eCCR trimix élémentaire reprend donc la même structure que celle à l'air, à laquelle on rajoutera les éléments communs aux cursus CO et CCR et surtout les éléments spécifiques (colonne 3) à l'utilisation d'un eCCR avec diluant trimix normoxique.

VI.4 Bibliographie

Livres et manuels en anglais :

- Rebreathers simplified: a complete guide to choosing, understanding and diving a Closed Circuit Rebreather. Dr. Mel Clark. Ed SilentScuba LLC 2009
- CCR Trimix Simplified. Dr. Mel Clark. Ed SilentScuba LLC 2009
- Inspiration/Evolution Rebreather Manual. Technical Diving International
- Rebreather Diver: Student Manual and Workbook. IANTD.

Mémoires d'instructeurs fédéraux :

- Avec ou sans bulle. Mémoire d'I.N. d'Eric Bahuet. Novembre 2003.
- Les recycleurs en plongée loisir : utopie ou réalité ? Mémoire d'I.R. de Renaud Jourdan, CTR Est, Juillet 2004
- Accidents liés à la pratique des recycleurs en plongée. Mémoire d'I.N. de Laurent Marcoux. Septembre 2010.

Livres et manuels en français :

- Plongées sans bulles: Immersions en recycleur Inspiration. Eric Bahuet, Jean-Marc Belin, Laurent Ballesta, Didier Borg. 2007.
- Les Recycleurs : principes, gestion, stratégies de décompression. Jacques Vettier. Ed. Ulmer, 2007

- Nitrox & Recycleur: manuel technique. Planification, montage, tests, entretien. Jean-François André. www.hippoconsulting.com

- Le guide de la plongée Tek. François Brun, Pascal Bernabé, Patrice Strazzera. Editions Gap. 2008

- Manuel de formation technique FFESSM, cursus recycleurs fermés (www.infoplongee.fr)

- Manuel d'utilisation du recycleur Inspiration de Ambient Pressure Diving (disponible au téléchargement sur www.apdiving.com)

VI.5 Sites web de référence

Sites anglophones :

- www.rebreatherworld.com

- www.therebreathersite.nl

- http://www.submergeproductions.com/videos.aspx?mode=episodeview&channelid=3&episodeid=114 : interview expliquant pour les anglophones la stratégie de PADI sur le marché des recycleurs fermés électroniques pour le grand public.

Sites francophones :

- http://recycleur.free.fr

- www.onplonge.com

- http://hlbmatos.free.fr/